



TUGAS AKHIR - TM091585

**Studi Numerik Karakteristik Pembakaran Batubara,
Dengan Variasi Laju Aliran Massa *Swirl Air* dan Panjang
dimensi *Extension Pipe* Pada Rancangan *Start Up Burner***

ADITYA PRIMADI PUTRA
NRP. 2112 105 049

Dosen Pembimbing
Ir. Eddy Harmadi Tjokrowisastro, ME

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



TUGAS AKHIR - TM091585

**Numerical Study Of Coal Combustion Characteristics
With Variations In The Mass Flow Rate Of Swirl Air And
Length Dimensions Of The Extension Pipe For The Start-
Up Burner Design**

ADITYA PRIMADI PUTRA
NRP. 2112 105 049

Dosen Pembimbing
Ir. Eddy Harmadi Tjokrowisastro, ME

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

**Studi Numerik Karakteristik Pembakaran Batubara, Dengan
Variasi Laju Aliran massa *swirl air* dan Panjang dimensi
Extension Pipe pada rancangan *start up burner***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik pada Bidang Studi Konversi Energi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

ADITYA PRIMADI PUTRA
NRP.2112 105 049

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. **Ir. Eddy Harmadi T, ME**
(NIP. 19500314 197803 1 001) (Pembimbing)
2. **Ir. Witantyo, M.Eng. Sc**
(NIP. 19630314 198803 1 002) (Penguji I)
3. **Dr. Bambang Sudarmanta, ST**
(NIP. 19730116 199702 1 001) (Penguji II)
4. **Giri Nugroho, ST., M.Sc**
(NIP. 19800517 2010 12 000) (Penguji III)

SURABAYA
Januari 2015

KATA PENGANTAR

Puji Syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, sang pencipta alam semesta. Shalawat serta salam saya haturkan kepada nabi Muhammad SAW. Syukur sebagai bukti atas nikmat yang diberikan – Nya sehingga penyusun diberikan izin, kemudahan, serta kelancaran dalam menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul :

“Studi Numerik Karakteristik Pembakaran Batubara, Dengan Variasi Laju Aliran Massa *Swirl Air* dan Panjang dimensi *Extension Pipe* Pada Rancangan *Start Up Burner*”.

Penyusunan tugas akhir ini bukan semata karena kemampuan penyusun, tetapi juga karena adanya campur tangan dari beberapa pihak yang mau meluangkan waktu, tenaga, dan pikirannya dalam penyelesaian tugas akhir ini. Maka dari itu, dalam kesempatan ini saya juga mengucapkan terima kasih banyak kepada :

1. Orang tua tercinta yang telah memberikan dorongan dan semangat dengan cinta dan kasih sayangnya yang tiada batas dan tak terbalaskan, serta doa restunya.
2. Bapak Ir. Eddy Harmadi T, ME. selaku dosen pembimbing yang telah menyumbangkan waktu, tenaga, serta pikirannya sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
3. Bapak Bambang Pramujati, ST., MT., PhD. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
4. Arif Wahyudi, ST., MT., PhD selaku koor-dinator proposal dan tugas akhir.
5. Bapak dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan kritik dan saran demi kesempurnaan tugas akhir ini.
6. Semua Bapak dan Ibu dosen Teknik Mesin yang telah memberikan ilmu selama kuliah. Juga untuk seluruh karyawan Teknik Mesin atas pelayanannya.
7. Aldo, Bambang, Toni dan Tyo selaku partner tugas akhir yang selalu membantu dan berdiskusi. Juga seluruh angkatan 2012 Lintas Jalur atas canda dan tawanya selama kuliah.

8. Seluruh warga Mesin ITS serta berbagai pihak yang belum tertulis dan yang tidak mungkin disebutkan satu persatu yang telah berperan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

Akhir kata semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua. Penulisan tugas akhir ini masih banyak kekurangan, oleh karena itulah segala kritik dan saran sangat kami harapkan.

Surabaya, Januari 2015

Penulis

ABSTRAK

Saat ini kebutuhan minyak (HSD) untuk *cold start* PLTU sangat tinggi. Harga BBM yang terus meningkat membuat biaya operasi PLTU menjadi tinggi karena masih menggunakan BBM untuk start up. Biaya *start-up* yang sedemikian tinggi memunculkan ide penggunaan Burner kombinasi berbahan bakar Minyak dan Batubara yang ditargetkan akan dapat mengurangi konsumsi minyak hingga 70% nya. Dimana bukan solar yang digunakan untuk *start up* tetapi *pulverized coal* yang langsung dibakar.

Penelitian dilakukan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)* untuk menganalisa model *extension pipe startup burner* yang sudah dirancang dengan variasi laju aliran massa pada *swirl air*. Pembuatan geometri *start up burner* menggunakan *GAMBIT 2.4.6*, sedangkan untuk simulasi numerik menggunakan *Ansys Fluent 14.0*. Simulasi yang dilakukan yaitu memasukkan model turbulensi, *materials*, *operating conditions*, *boundary conditions*, *solution*, *initialize*, dan *monitor residual*. Model turbulensi yang digunakan adalah model turbulensi *k-ε standard*. Material yang digunakan adalah serbuk batubara dan udara. *Boundary condition* yang ditetapkan yaitu *mass flow* untuk *Carrier air*, coal dan *swirl air*. Kemudian untuk pengaturan outlet sebagai pressure outlet.

Hasil yang didapatkan dari hasil simulasi ini bahwa penambahan laju aliran massa pada *swirl air* yang optimum sebesar 0,061 kg/s untuk setiap desain geometri *extension pipe*, sedangkan laju pembakaran yang terbesar didapatkan dari desain *extension chamber* 150 mm dengan laju aliran massa 0,061 kg/s.

Kata kunci: *start up burner, pulverized, batubara, fluent, simulasi, pembakaran, swirl air.*

ABSTRACT

Currently the demand for oil (HSD) for cold start high power plants. Increasing fuel prices make power plant operating costs are high because they use the fuel to start up. Start-up costs so high that led to the idea of using a combination of fuel Burner Oil and Coal targeted will reduce oil consumption by up to 70% of them. Where instead of diesel fuel that is used to start up but the pulverized coal is burned directly.

The study was conducted using Computational Fluid Dynamics (CFD) to analyze models extension pipe burner startup that has been designed with variations in the mass flow rate of swirl air. Making a start-up burner geometry using GAMBIT 2.4.6, while for the numerical simulation using ANSYS FLUENT 14.0. Simulations were performed which include turbulence models, materials, operating conditions, boundary conditions, solution, initialize, and monitor residual. Turbulence models used are k- ϵ turbulence model standard. The material used is pulverized coal and air. Boundary condition stipulated that the mass flow air for Carrier, coal and swirl air. Then for setting the outlet as the outlet pressure.

The results obtained from the simulation results that the addition of the mass flow rate at the optimum swirl air of 0.061 kg/s for each design geometry extension pipe, whereas the largest firing rate obtained from the design of the extension chamber of 150 mm with a mass flow rate of 0.061 kg/s.

Keywords: start-up, burner, pulverized, coal, fluent, simulation, combustion, swirl air.

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Dasar Teori.....	5
2.1.1 Boiler.....	5
2.1.2 Prinsip Pembakaran	7
2.1.3 Perhitungan Stoikiometri	9
2.1.4 Laju Massa Batubara	11
2.1.5 Sistem pembakaran	12
2.1.6 Batubara.....	13
2.2 Ansys Fluent 14.0.....	14
2.2.1 Struktur Program	14

2.2.2 Kemampuan Fluent	15
2.2.3 Prosedur Simulasi Aliran dan Temperatur	15
2.3. GAMBIT.....	16
2.3.1. Membuat Geometri	17
2.3.2. Proses <i>Meshing</i>	17
2.3.3. Tipe Batas dan Kontinum.....	18
2.4. Menggunakan FLUENT Untuk Simulasi Aliran Fluida 3D	19
2.4.1. Pemilihan Solver.....	19
2.4.2. Mengimpor Model dan Memeriksa <i>Mesh</i>	19
2.4.3 Parameter Solver	20
2.4.4 Formulasi Solver	21
2.4.5. Waktu (<i>Time</i>)	23
2.4.6. Model Turbulensi	23
2.4.7. Model $k-\epsilon$	24
2.4.8. Kondisi Operasi	24
2.4.9 Kondisi Batas	24
2.4.10. Iterasi	26
2.5. Model Numerik Simulasi Non-Premix Combustion.....	27
BAB III METODE PENELITIAN	29
3.1 Objek Penelitian	29
3.2 Pembuatan Model Uji Pada <i>Software</i> GAMBIT	30

3.2.1 Membuat Model Geometri.....	31
3.2.2 Menyusun Elemen Meshing	31
3.2.3 Grid Indendency.....	31
3.2.4 Boundary Condition.....	34
3.3 Prosedur Penelitian.....	35
3.3.1 Grid.....	35
3.3.2 Models	35
3.3.3 Materials	41
3.4 Validasi	42
3.5 Metode Pengambilan Data <i>Mass Fraction</i>	43
3.6 Flowchart	44
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN.....	45
4.1 Analisa Pada Kontur Temperatur.....	45
4.2 Analisa Pada Particle Tracks Coal berdasarkan warna temperatur	47
4.3 Analisa Pada O ₂	38
4.4 Analisa Pada CO ₂	48
4.5 Analisa Pada Pollutant NO.....	53
BAB V PENUTUP	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran.....	57

DAFTAR PUSTAKA



Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Klasifikasi batubara (American Standard for testing and materials)</i>	15
Taabel 3.1 Data grid indenpendency pada geometri extension pipe 50 mm	32
Tabel 3.1 Nama Boundary Condition Pemodelan Sistem dan Tipenya	34
Tabel 3.2 Data parameter-parameter batubara dari PT. PJB Unit pembangkitan Paiton.....	38
Tabel 3.3 Panjang nyala api dan Laju pembakaran secara eksperimen	42
Tabel 3.4 Panjang nyala api dan Laju pembakaran secara simulasi ansys fluent	42
Tabel 4.1 Data hasil iterasi temperatur dari variasi <i>extension pipe</i> terhadap laju aliran massa	46
Tabel 4.2. Data <i>mass fraction</i> O ₂ pada extension pipe 75 mm.....	50
Tabel 4.3. Data <i>mass fraction</i> CO ₂ pada extension pipe 75 mm terhadap laju aliran massa.....	52
Tabel 4.4. Data <i>mass fraction</i> NO pada extension pipe 75 mm	54

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.8 Ilustrasi proses pembakaran pada tangentially-fired boiler .	6
Gambar 2.9 Kriteria hasil pembakaran sempurna, baik, dan tak sempurna (<i>Bureau of Energy Efficiency, 2004</i>)	9
Gambar 2.10. Pemilihan parameter pada menu solver	21
Gambar 3.1 geometri open chamber burner	29
Gambar 3.2 geometri burner	30
Gambar 3.3 burner dengan panjang second chamber 150 mm di software GAMBIT 2.4.6	31
Gambar 3.4 hasil meshing.....	31
Gambar 3.5 meshing dengan aspek rasio besar	32
Gambar 3.6 meshing dengan aspek rasio sedang	33
Gambar 3.7 meshing dengan aspek rasio kecil	33
Gambar 3.8 Boudary condition model uji	34
Gambar 3.9 mengaktifkan model energy	35
Gambar 3.10 viscous model untuk mengaktifkan persamaan k-epsilon (2eqn)	36
Gambar 3.8 radiation model.....	32
Gambar 3.11 memilih jenis non-premix pada species model.....	37
Gambar 3.12 menginputkan nilai properties batubara dalam coal calculator.....	39
Gambar 3.13 set injections properties	40

Gambar 3.13 mengaktifkan Pollutan NO.....	41
Gambar 3.14 Grafik laju pembakaran Eksperimen vs laju pembakaran simulasi.....	43
Gambar 3.12 titik pengambilan <i>mass fraction</i> gas buang.....	43
Gambar 4.1 kontur temperatur untuk variasi extension pipe dan laju aliran massa swirl air	45
Gambar 4.2 Grafik Volume Nyala Api dari variasi laju aliran massa ..	46
Gambar 4.3 <i>Particle Tracks coal</i> berdasarkan warna temperatur	48
Gambar 4.4 Kontur <i>species O₂ extension pipe 75 mm</i>	49
Gambar 4.5 Grafik <i>mass fraction O₂</i> terhadap kontur laju pembakaran	50
Gambar 4.6 Kontur <i>species CO₂ extension pipe 75 mm</i>	51
Gambar 4.7 Grafik <i>mass fraction CO₂</i> terhadap kontur laju pembakaran.....	52
Gambar 4.8 Kontur <i>mass fraction pollutant NO extension pipe 75 mm</i>	53
Gambar 4.9 Grafik <i>mass fraction CO₂</i> terhadap kontur laju aliran massa	54

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Saat ini kebutuhan minyak (HSD) untuk cold start PLTU sangat tinggi. Data menunjukkan bahwa konsumsi HSD untuk cold start adalah 2058 kiloliter pada tahun 2010, 1289 kiloliter pada tahun 2011, dan 636 kiloliter untuk setengah tahun pertama pada tahun 2012. Mengingat harga minyak HSD yang terus meningkat maka kebutuhan biaya BBM untuk sekali cold start bisa mencapai sekitar Rp. 1.2 milyar ketika harga BBM mencapai sekitar 90 USD perbarrel.

Pada saat start up, pembakaran tidak langsung dilakukan dengan batu bara, tetapi mempergunakan bahan bakar minyak. Baru setelah beban mencapai 10%-15% batu bara pelan-pelan mulai masuk menggantikan minyak. Proses *start up* adalah proses memanaskan burner sampai temperatur operasi sehingga batubara yang masuk dapat terbakar, pada proses *start up* tersebut membutuhkan jumlah bahan bakar solar yang besar dan waktu yang lama sehingga biaya yang dikeluarkan untuk proses tersebut sangat besar, maka dibutuhkan suatu pengembangan desain pada sistem tersebut khususnya pada bagian *Start up Burner*.

Biaya start-up yang sedemikian tinggi memunculkan ide penggunaan Burner kombinasi berbahan bakar Minyak dan Batubara yang ditargetkan akan dapat mengurangi konsumsi minyak hingga 70% nya. Dimana bukan solar yang digunakan untuk start up tetapi pulverized coal yang langsung dibakar.

Pengembangan desain burner kombinasi memerlukan waktu riset yang lama dan eksperimen yang memakan biaya banyak adalah suatu hal yang saat ini tidak diharapkan dalam perkembangan industri. Melihat permasalahan yang ada maka perlu dilakukan simulasi pembakaran pada start up burner yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik pembakaran pada desain start up burner kombinasi dengan waktu yang lebih cepat dan biaya yang tidak banyak.

1.2 Perumusan masalah

Pelaksanaan penelitian dilakukan dengan pemodelan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) menggunakan *software Ansys Fluent 14.0*. yang diteliti dari hasil simulasi adalah nyala api pembakaran pada extension chamber startup burner yang geometrinya di variasikan 75 mm; dan 150 mm dengan laju aliran massa swirl air 0.077 kg/s; 0.061 kg/s; dan 0.047 kg/s, campuran *pulverized coal* dan udara yang dialirkan ke dalam burner akan dibakar menggunakan solar *burner*, simulasi dilakukan untuk mengetahui panjang nyala api dan distribusi temperatur yang optimal serta hasil emisi yang dibentuk.

1.3 Batasan masalah

Untuk menganalisa permasalahan di atas, terdapat beberapa batasan masalah yang diambil dalam penelitian ini, diantaranya :

1. Simulasi pembakaran secara *three dimensional* (3D) dilakukan pada sebuah model *start up burner* yang telah ditentukan geometrinya.
2. Simulasi yang dilakukan dengan asumsi campuran batubara dan udara terbakar sempurna.
3. Data BBM dan *pulverized coal* diperoleh dari PT. PJB UP Paiton.
4. Software yang digunakan pada tahapan pembuatan geometri adalah software *GAMBIT 2.4.6*, sedangkan untuk tahapan simulasi menggunakan software *ANSYS FLUENT 14.0*.
5. Fluida dianalisa sebagai compressible gas.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dengan adanya penelitian mengenai simulasi pembakaran pulverized coal di dalam burner yang telah dimodifikasi ini, diantaranya sebagai berikut :

1. Mengetahui karakteristik aliran udara dan *pulverized coal* di dalam *start up burner*.
2. Mengetahui fenomena pembakaran yang terjadi di *start up burner* berdasarkan visualisasi distribusi temperatur.

3. Mengetahui variasi laju aliran massa swirl air, dan panjang ruang bakar pada extension chamber untuk mendapatkan hasil pembakaran yang optimum.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari hasil penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik pembakaran dari campuran bakar solar, pulverized coal dan udara yang terjadi sehingga hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi. Selain itu, dari hasil penelitian ini juga dapat memberikan pengetahuan dan pengalaman mengenai konsep studi CFD *Computational Fluid dynamics* untuk simulasi pembakaran pulverized coal, dan udara di dalam suatu burner menggunakan software *GAMBIT 2.4.6* untuk menggambarkan geometri dari burner dan *ANSYS FLUENT 14.0* untuk proses simulasi pembakaran yang terjadi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

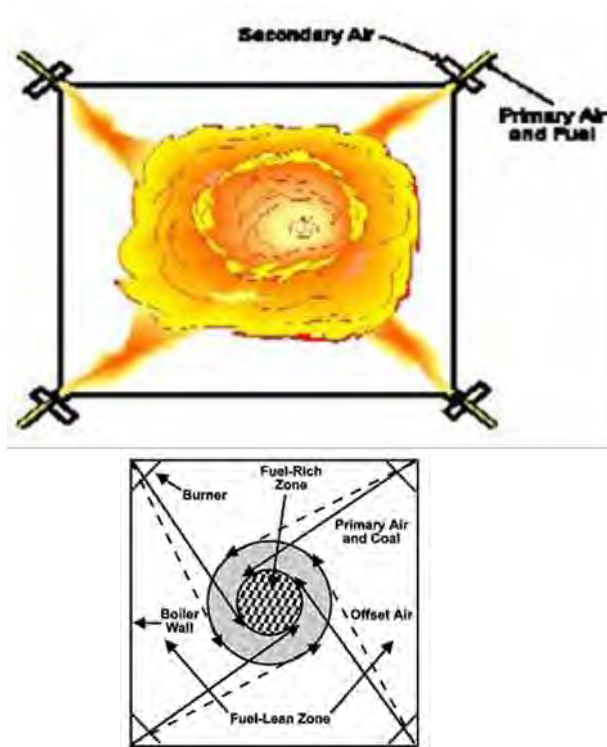
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Dasar teori

2.1.1. Boiler

Boiler merupakan suatu peralatan yang berfungsi menguapkan suatu fluida kerja di dalamnya. Fluida kerja yang pada umumnya digunakan adalah air. Secara khusus, *boiler* mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi kalor di dalam *steam*, atau energi kalor dari gas panas menjadi energi kalor dari *steam* tanpa melibatkan proses pembakaran. Pada *boiler*, terdapat dua proses utama yang bekerja, yakni pembakaran dan perpindahan panas. Pembakaran bertujuan melepaskan energi panas dari bahan bakar menggunakan *firing equipment*. Sedangkan perpindahan panas terjadi antara *flue gas* hasil pembakaran bahan bakar dengan air maupun uap air di dalam komponen *heat traps* dari *boiler*.

Pada PLTU unit 1 dan 2 PT. PJB UP Paiton, jenis *boiler* yang digunakan berdasarkan pipanya adalah *watertube boiler*, dimana fluida kerja dalam fase cair atau uap, dialirkan melalui sisi dalam *tube*, sedangkan *flue gas* dari pembakaran mengalir pada sisi luar *tube*, dan jika berdasarkan bahan bakar yang digunakan adalah boiler bahan bakar padat tipe *pulverized coal boiler*. Untuk metode pembakaran dari *boiler* tersebut adalah *tangensial wall firing*, dimana proses pembakaran dilakukan dengan menggunakan empat buah burner dari keempat sudut untuk menciptakan bola api pada pusat tungku. Gambar 2.1 merupakan skema dari sistem *boiler* PLTU unit 1 dan 2, PT. PJB UP Paiton.



Gambar 2.8 *Ilustrasi proses pembakaran pada tangentially-fired boiler*

Terdapat beberapa komponen utama yang menunjang proses pembakaran maupun perpindahan panas di dalam *boiler* PLTU unit 1, PT. PJB UP Patiton, diantaranya:

1. *Boiler furnace* merupakan ruang terjadinya pembakaran bahan bakar. Di dalam *furnace* terdapat *firing equipment* yang berfungsi menginjeksikan serta membakar campuran bahan bakar dan udara yang dimasukkan ke dalam *furnace*.
2. *Burner* merupakan salah satu *firing equipment* yang berfungsi untuk yang berperan dalam memasukkan

bahan bakar dan udara kedalam *furnace*, dan didalam *burner* juga terdapat *ignitor* yang berfungsi sebagai pemicu pembakaran dari bahan bakar dan udara yang kemudian pembakaran dan *flue gas* berlanjut ke dalam *furnace*.

3. *Waterwall*, merupakan komponen yang berperan dalam proses penguapan air dan terletak pada dinding *boilerfurnace*.
4. *Primary Air Fan* (PA Fan) berfungsi sebagai pemasok *Primary Air* (udara primer). Udara primer yang dihembuskan menuju ke alat penggiling batubara (*Pulverizer*) kemudian bersama-sama dengan serbuk batubara dialirkan ke *Furnace*.
5. *Force Draft Fan* (FD Fan) dan *Induced Draft Fan* (ID Fan) berfungsi sebagai pemasok *Secondary Air* (udara sekunder)
6. *Steam Drum* Berfungsi untuk menyimpan air dalam volume yang besar dan untuk memisahkan uap dari air setelah proses pemanasan yang terjadi dalam boiler.

2.1.2 Prinsip Pembakaran

Proses pembakaran merupakan laju oksidasi dari suatu bahan bakar yang tersusun dari komponen *hydrocarbons* dalam menghasilkan energi panas. Pembakaran sempurna dari suatu bahan bakar dapat dicapai dengan adanya campuran yang tepat antara jumlah bahan bakar dan oksigen. Bahan bakar padat maupun cair, harus berubah dalam fase gas sebelum terbakar, sedangkan bahan bakar gas akan terbakar dengan sendirinya apabila terdapat persentase campuran udara yang tepat. Biasanya, diperlukan adanya pemanasan dalam mengubah bahan bakar padat maupun cair menjadi fase gas. Kriteria pembakaran yang baik dan sempurna adalah proses pembakaran yang dapat melepas keseluruhan energi panas yang terkandung dalam bahan bakar. Untuk memperoleh keseluruhan energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran, nyala api pembakaran yang dihasilkan harus pada kondisi stabil, tidak padam, dan juga tidak terjadi nyala api balik ke arah *burner*, selain itu juga harus di perhatikan bahwa dalam pembakaran

terdapat laju perambatan api, sehingga aliran atau laju dari bahan bakar atau campuran bahan bakar dan udara tidak boleh lebih besar dari pada laju pembakarannya, karena akan dapat menyebabkan kegagalan pembakaran atau bahan bakar tidak terbakar.

Syarat terjadinya pembakaran diperlukan adanya tiga parameter utama, diantaranya:

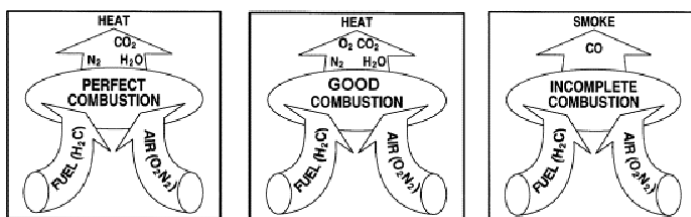
1. Adanya pemicu atau pemantik, untuk memicu dan menjaga kontinuitas proses pembakaran. Namun ada juga yang tidak menggunakan pemantik tetapi memanfaatkan tekanan atau temperatur tinggi melebihi temperatur bakar dari bahan bakarnya, sehingga dengan masuknya bahan bakar dan udara pembakaran akan secara langsung terjadi dengan sendirinya dan berkelanjutan.
2. Bahan bakar, dalam hal ini bahan bakarnya adalah batubara dan solar.
3. Udara(oksigen).

Sedangkan untuk memperoleh pembakaran batu bara yang sempurna diperlukan beberapa parameter diantaranya:

1. Temperatur tinggi, untuk memicu dan menjaga kontinuitas proses pembakaran.
2. Turbulensi aliran, untuk memaksimalkan pencampuran bahan bakar dan udara menjadi homogen.
3. Temperatur udara yang masuk, jika temperatur udara yang masuk lebih tinggi maka pembakaran akan mudah terjadi.
4. Kondisi Bahan bakar, jika batubara yang di bakar kadar airnya terlalu besar maka pembakaran akan lebih sulit terjadi.
5. Durasi atau rentang waktu, untuk membakar bahan bakar secara keseluruhan.

Pembakaran dengan bahan bakar berlebih maupun kekurangan, dapat memperbesar potensi adanya bahan bakar yang tidak terbakar maupun pembentukan CO. Berdasarkan hal tersebut, diperlukan

adanya komposisi O_2 yang tepat dengan adanya *excess air* untuk memastikan terjadinya pembakaran sempurna. Namun, dengan terlalu banyak komposisi *excess air*, juga dapat meningkatkan kerugian panas maupun efisiensi dari pembakaran. Hal tersebut dikarenakan energi panas yang dilepaskan dari proses pembakaran semakin banyak diserap oleh komponen N_2 di dalam udara yang tidak dapat terbakar. Pada dasarnya udara tersusun dari komponen N_2 sekitar 78%, O_2 sekitar 21%, dan 1% sisanya adalah *argon* dan gas-gas yang lain. Gambar 2.2 merupakan penjelasan mengenai sifat pembakaran yang terjadi.

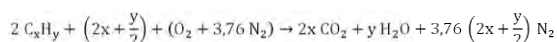


Gambar 2.9. Kriteria hasil pembakaran sempurna, baik, dan tak sempurna (Bureau of Energy Efficiency, 2004)

2.1.3. Perhitungan Stoikiometri

a. Fuel Oil

Pada umumnya, pembakaran sempurna atau *stoichiometry* hanya menghasilkan komponen CO_2 , uap air (H_2O), dan energi panas. Berikut di bawah ini merupakan simplifikasi persamaan untuk reaksi pembakaran *stoichiometry* antara suatu bahan bakar *hydrocarbon* atau *Fuel Oil* dengan udara secara umum:



b. Pulverized Coal

Definisi yang lain tentang proses pembakaran adalah reaksi yang sangat cepat antara bahan bakar dengan oksider untuk menghasilkan produk. Dalam hal ini oksider adalah udara. Udara terdiri atas 21 % oksigen dan 79 % nitrogen (basis molal). Pembakaran terjadi sempurna apabila :

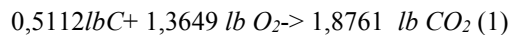
1. Semua Carbon C yang terdapat di dalam bahan bakar menjadi CO_2 di dalam produk
2. Semua Hidrogen H yang terdapat dalam bahan bakar menjadi H_2O didalam produk dan
3. Semua Sulfur S di dalam bahan bakar menjadi SO_2 di dalam produk.

Dari gambaran ini terlihat bahwa unsur Carbon, Hidrogen dan Sulfur yang terkandung dalam bahan bakar misalnya batubara sangat menentukan kebutuhan udara pembakaran. Dibawah ini merupakan contoh reaksi pada ketiga unsur tersebut untuk mendapatkan jumlah udara yang dibutuhkan berdasarkan metode **gravimetri**. Data batubara dari PT. PJB Paiton yang paling bagus dari 3 *suplier* adalah batu bara A, mengandung 51,12 % C, 0,98 % N_2 , 13,78 % O_2 , 3,12% H_2 0,31 % S .

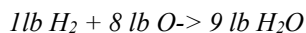
- Reaksi pembakaran carbon dengan oksigen adalah :

$$1\text{lbC} + 2,67\text{lb O}_2 \rightarrow 3,67 \text{ lb CO}_2$$

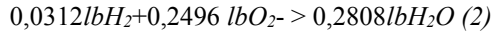
Karena batubara mengandung 51,12% C maka persamaan reaksi di atas menjadi:



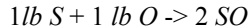
- Reaksi pembakaran antara hidrogen dengan oksigen adalah :



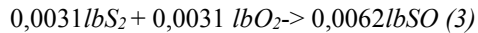
Kandungan hidrogen dalam batubara antracite adalah 3,12%, maka persamaan reaksi menjadi :



- Reaksi pembakaran antara sulfur dengan oksigen adalah :



Kandungan sulfur dalam batubara antracite adalah 0,7 %, sehingga persamaan reaksi menjadi :



Jumlah oksigen pada persamaan (1),(2) dan (3) = $1,3649 + 0,2496 + 0,0062 = 1,6519 \text{ lb } O_2$. Oleh karena batubara mengandung $0,1378 \text{ lb } O_2$, maka oksigen yang diperlukan dari udara adalah = $1,6519 \text{ lb } O_2 - 0,1378 \text{ lb } O_2 \text{ dari batubara} = 1,5141 \text{ lb } O_2$. Berat udara teoritis = $1,5141 (1 \text{ lb } O_2 + 3,76 \text{ lb } N_2 = 4,76 \text{ lb udara}) = 1,5141 \text{ lb } O_2 + 5,693 \text{ lb } N_2 = 7,2071 \text{ lb udara}$

Kelebihan udara untuk membakar bahan bakar batubara antracite adalah 5 % , maka kebutuhan udara untuk pembakaran batubara antracite adalah = $1,05 \times 7,2071 \text{ lb udara/ lb batubara} = 7,5675 \text{ lb udara/lb batubara}$

2.1.4 Laju Massa Batubara (*coal feed rate*)

Pada simulasi yang dilakukan ini, jumlah atubara yang dimasukkan kedalam burner tergantung dari pada besarnya perdaan tekanan pada venturi yang digunakan, sehingga diperlukan simulasi aliran udara yang terjadi dalam venturi sehingga dengan adanya perbedaan tekanan tersebut dapat diketahui kecepatan yang di terima oleh batu bara dengan menggunakan persamaan *bernouli*.

Untuk menghitung *mass flowrate* batubara dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$\dot{m} = \rho \times v \times A \dots \dots \dots (2.2)$$

dimana :

\dot{m} = Laju massa batubara (Kg/s)

V = Kecepatan Batubara (m/s)

ρ = Massa Jenis batubara (Kg/m³)

A = Luas penampang Inlet batubara (m²)

2.1.5 Sistem Pembakaran

Sistem pembakaran bahan bakar yang digunakan bergantung pada jenis penggunaannya. Terdapat dua jenis sistem pembakaran, yakni :

a. Diffusion system

Pada sistem pembakaran diffusion, pencampuran bahan bakar dan udara terjadi pada sisi dalam dari burner, atau bahan bakar dan udara mengalir pada laluan yang berbeda menuju combustion chamber. Parameter yang mengindikasikan intensitas pencampuran adalah swirl number. Swirl number merupakan rasio antara momen radial dan momen aksial dari total aliran di dalam burner.

b. Premix system

Pada sistem pembakaran premix, kebutuhan udara yang diperlukan untuk pembakaran dicampur secara keseluruhan dengan bahan bakar sebelum terjadinya proses pembakaran di dalam combustion chamber. Hal tersebut akan menghasilkan pencampuran bahan bakar dan udara sebelum memasuki burner untuk meningkatkan laju pembakaran dan volum beban termal.

2.1.6 Batubara

Batubara merupakan bahan bakar dalam fase padat yang berasal dari endapan fosil dan tumbuhan dalam tanah dan mengandung beberapa unsur utama seperti karbon, hidrogen dan oksigen. Semakin lama umur endapan dari batu bara, nilai kalor atau kualitasnya juga semakin bagus. Selain itu, meskipun batubara memiliki nilai kalor per unit massa yang tidak lebih besar dibandingkan dengan jenis bahan bakar lainnya, namun persediaannya bisa dibilang masih cukup banyak sehingga para investor dan perusahaan-perusahaan lokal makin banyak membangun pembangkit berbahan bakar batu bara. Klasifikasi batubara berdasarkan nilai kalorinya dapat ditabelkan sebagai berikut.

Tabel 2.3 *Klasifikasi batubara (American Standard for testing and materials)*

<i>Class</i>	<i>Group</i>	<i>Calorific Value Limits (MJ kg⁻¹)</i>
<i>Anthracite</i>	<i>Meta-anthracite</i>	-----
	<i>Anthracite</i>	32.5 – 34.0
	<i>Semianthracite</i>	26.7 – 32.5
<i>Bituminous</i>	<i>Low volatile bituminous</i>	-----
	<i>Medium volatile bituminous</i>	-----
	<i>High volatile A Bituminous</i>	≥ 32.6
	<i>High volatile B Bituminous</i>	30.2 – 32.6

	<i>High volatile C Bituminous</i>	24.4 – 30.2
<i>Subbituminous</i>	<i>Subbituminous A</i>	24.4 – 26.7
	<i>Subbituminous B</i>	22.1 – 24.4
	<i>Subbituminous C</i>	19.3 – 22.1
<i>Lignite</i>	<i>Lignite A</i>	14.7 – 19.3
	<i>Lignite B</i>	≤ 14.7

Sesuai dengan klasifikasi yang dibuat oleh ECE-United Nations dan berdasarkan data batubara yang digunakan PT. PJB Paiton, maka batubara tersebut termasuk batubara *semianthracite* atau *High volatile C Bituminous*. Semakin tinggi nilai kalor yang terkandung dalam suatu batubara, maka kandungan *fixed carbon* semakin banyak dan kandungan *moisture* semakin sedikit.

2.2. Ansys Fluent 14.0

ANSYS FLUENT adalah program komputer yang digunakan untuk mensimulasikan aliran fluida dan perpindahan panas. Aliran dan perpindahan panas dari berbagai fluida dapat disimulasikan pada bentuk/geometri yang rumit. Dengan menggunakan program FLUENT, dapat diketahui parameter-parameter aliran dan perpindahan panas yang diinginkan. Distribusi tekanan, kecepatan aliran, laju aliran massa, dan distribusi temperatur dapat diketahui pada tiap titik yang terdapat dalam sistem yang dianalisa.

2.2.1. Struktur Program

Dalam satu paket program FLUENT terdapat beberapa produk, yaitu:

- FLUENT

- prePDF, merupakan *preprocessor* untuk memodelkan pembakaran *non-premixed* pada FLUENT.
- GAMBIT, merupakan *preprocessor* untuk memodelkan geometri dan pembentukan *mesh*.
- Tgrid, merupakan *preprocessor* tambahan yang dapat membuat *mesh* volume dari *mesh* lapisan batas yang sudah ada.
- Filter untuk mengimpor *mesh* permukaan dan volume dari program CAD/CAE
Seperti ANSYS, CGNS, I-DEAS, NASTRAN, PATRAN, dll.

Untuk melakukan simulasi aliran, biasanya dilakukan pemodelan geometri dan *meshing* dengan menggunakan GAMBIT, diikuti dengan simulasi menggunakan FLUENT. Struktur komponen perangkat lunak FLUENT.

2.2.2 Kemampuan FLUENT

FLUENT memiliki kemampuan pemodelan sebagai berikut:

- Aliran 2D, 2D *axisymmetric*, 2D *axisymmetric* dengan *swirl*, dan 3D.
- Aliran tunak (*steady*) ataupun transien.
- Aliran fluida kompresibel dan inkompresibel untuk semua daerah kecepatan (subsonik, supersonik, dan hipersonik).
- Aliran invsik, laminar, dan turbulen.
- Perpindahan panas, meliputi konveksi paksa, konveksi bebas, campuran, konjugasi (padatan fluida), dan radiasi.

Idealnya, FLUENT sangat sesuai untuk mensimulasikan aliran kompresibel maupun inkompresibel pada geometri yang rumit.

2.2.3 Prosedur Simulasi Aliran dan Temperatur

Agar dapat mensimulasikan aliran dengan menggunakan FLUENT, model geometri harus terlebih dulu dibuat dan berbagai parameter simulasi harus terlebih dulu ditentukan. GAMBIT

berfungsi untuk membuat model geometri, melakukan *meshing* pada model, dan mendefinisikan bidang batas pada model. Berbagai parameter pada FLUENT harus ditentukan sebelum dapat dilakukan iterasi. Parameter yang harus ditentukan antara lain: formulasolver, kondisi operasi, model turbulensi, sifat-sifat material, dan kondisi batas.

2.3. GAMBIT

GAMBIT merupakan singkatan dari *Geometly And Mesh Building Intelligent Toolkit*. GAMBIT berfungsi untuk membuat model geometri dan mendefinisikan daerah yang akan dilalui fluida serta melakukan proses *meshing* pada daerah tersebut. Setelah semuanya dilakukan, model tersebut siap untuk dianalisis menggunakan FLUENT.

GAMBIT menggunakan *Graphical User Interface* (GUI) untuk memudahkan pemakainya. Dengan GUI, perintah masukan dapat diberikan dengan hanya menggunakan *mouse*. Tampilan GUI pada GAMBIT terdiri dari beberapa komponen utama, antara lain:

- *Main menu bar*, berfungsi untuk memilih menu-menu utama pada GAMBIT.
- Beberapa hal yang dapat dilakukan antara lain: membuka atau menyimpan *file*, mengimpor geometri dari program lain (ACIS, CATIA, CAD, dll), mengekspor *file* ke program lain, dan lain-lain.
- *Graphics window*, berfungsi untuk menampilkan geometri model yang sedang dibuat.
- *Operation toolpad*, berfungsi untuk memberikan perintah dalam membuat geometri, *meshing*, mendefinisikan zona, dan perintah-perintah operasi yang lain.
- *Command textbox*, berfungsi untuk memasukkan perintah diluar perintah yang ada pada GUI.
- *Transcript window*, berfungsi untuk menampilkan semua perintah dan proses yang dilakukan selama menggunakan GAMBIT.
- *Description window*, berfungsi untuk memberikan informasi singkat mengenai fungsi semua tombol GUI dan tampilan pada layar.

- *Global control*, berfungsi untuk mengatur tampilan layar pada GUI.

2.3.1. Membuat Geometri

Geometri dibuat dengan menggunakan *operation tool pad* geometri pada GUI. Secara garis besar, geometri pada GAMBIT dapat dibuat dengan dua cara, yaitu:

1. *Bottom - up*

Pembuatan geometri dengan cara ini dimulai dengan membuat geometri yang paling dasar sampai dengan yang paling rumit. Proses diawali dari pembuatan sebuah titik (*vertex*). Gabungan dari beberapa titik kemudian menjadi garis (*edge*). Beberapa kemudian digabungkan menjadi bidang (*face*). Terakhir, dibentuk sebuah volume sebagai kumpulan dari beberapa bidang.

2. *Top - Down*

Pembuatan geometri dengan cara ini dimulai dengan langsung membuat geometri volume. Volume dibuat dengan menggunakan perintah bentuk dasar, seperti: kubus, bola, silinder, dan geometri lainnya. Volume kemudian dimodifikasi dengan perintah-perintah yang ada.

2.3.2. Proses *Meshing*

Setelah geometri selesai dibuat, perlu dilakukan proses *meshing* (membagi volume menjadi bagian-bagian kecil) agar dapat dianalisis pada program CFD. Ukuran *mesh* yang terdapat pada suatu obyek akan mempengaruhi ketelitian dan daya komputasianalisis CFD. Semakin kecil/halus *mesh* yang dibuat, maka hasil yang didapatkan akan semakin teliti, namun dibutuhkan daya komputasi yang makin besar.

Konsep pembuatan *mesh* mirip dengan pembuatan geometri. Pembuatan *mesh* dapat dilakukan dengan cara *bottom-up* atau *top-down*. Metoda *bottom-up* dimulai dengan *meshing* garis, dilanjutkan dengan bidang, dan diakhiri dengan volume. Pada metode *top-down*, *meshing* langsung dilakukan pada volume. Ukuran *mesh* seragam disemua tempat pada metode *top-down*.

Oleh karena itu, metode *top-down* sesuai untuk geometri yang cukup rumit.

Pada penelitian ini dilakukan *meshing* dengan metoda *top-down*, sehingga pembahasan langsung kepada *meshing* volume. *Mesh* pada volume memiliki beberapa bentuk, antara lain: heksagonal, *wedge*, dan *tetragonal/hybrid*. Bentuk heksagonal lebih disukai karena mengurangi resiko kesalahan dan mengurangi jumlah elemen. Untuk dapat dilakukan *meshing* heksagonal, maka terkadang geometri yang rumit harus dipisah-pisah. Apabila geometri yang ada terlalu rumit, maka GAMBIT akan memilih bentuk *tetragonal/hybrid* secara otomatis.

Proses *meshing* dilakukan dengan menekan tombol perintah *mesh* volume yang ada pada *operation toolpad*. Pertama-tama volume yang diinginkan harus dipilih terlebih dahulu. Kemudian, bentuk yang diinginkan dapat dipilih pada tombol jenis elemen dan tipenya. Terakhir, harus ditentukan juga ukuran dari *mesh* yang diinginkan. Jendela perintah *meshing* terdapat pada *toolpad* operasi *meshing* yang terdapat dipojok kanan atas GUI.

2.3.3. Tipe Batas dan Kontinum

Untuk simulasi aliran 3D, semua bidang harus ditentukan tipe batasnya. Apabila tidak ditentukan, maka FLUENT akan mendefinisikan bidang sebagai dinding secara otomatis. Jika diinginkan, setiap bidang yang penting dapat diberi nama.

Setiap volume (kontinum) yang ada dalam model harus didefinisikan. Jenis kontinum yang terdapat pada GAMBIT adalah fluida dan padatan. Apabila tidak didefinisikan, secara otomatis FLUENT akan mendefinisikan kontinum sebagai udara. Jendela perintah definisi tipe batas dan kontinum terdapat disebelah *toolpad* operasi *meshing*.

2.4. Menggunakan Fluent untuk simulasi aliran fluida 3D

2.4.1. Pemilihan Solver

Pada awal menjalankan FLUENT, harus ditentukan solver yang akan digunakan. Terdapat beberapa pilihan, antara lain: 2 dimensi *single precision* atau *double precision* dan 3 dimensi *single precision* atau *double precision*. *Double precision* memiliki tingkat ketelitian di atas *single precision*, namun membutuhkan daya komputasi yang lebih besar. *Double precision* dibutuhkan untuk simulasi pada geometri yang sangat panjang, diameter yang sangat kecil, atau kasus konveksi dengan perbedaan konduktivitas yang tinggi.

2.4.2. Mengimpor Model dan Memeriksa *Mesh*

Model yang telah dibuat di GAMBIT harus dibuka di FLUENT untuk melakukan simulasi yang diinginkan. Proses membuka model dapat dilakukan dengan perintah:

File \longrightarrow Read \longrightarrow Case

File yang dapat dibuka adalah file dengan ekstensi *.msh dan *.cas. File dengan ekstensi *.msh adalah file model yang telah *di-mesh*. File dengan ekstensi *.cas adalah file kasus berisi model dan berbagai parameter simulasi yang telah ditentukan sebelumnya.

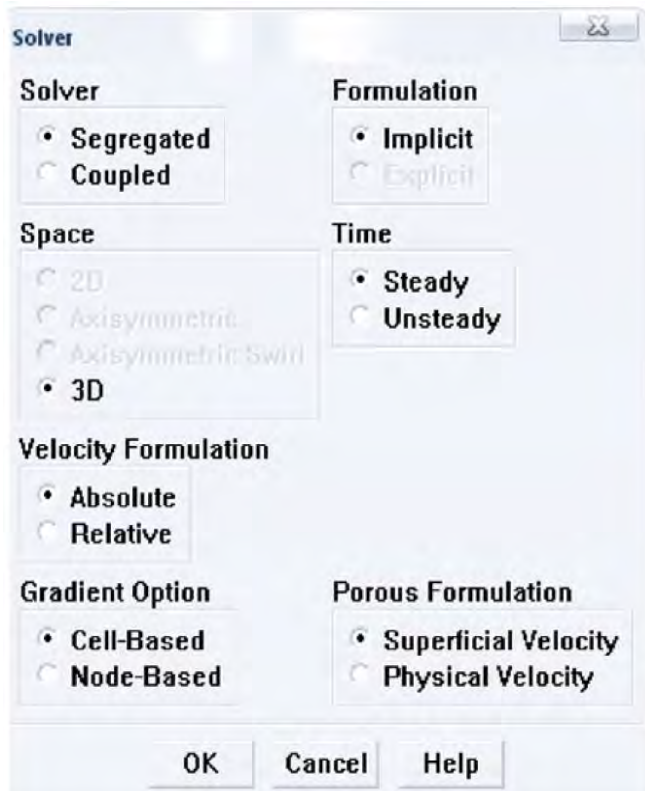
Setelah berhasil membaca file model, *mesh* yang ada harus dicek terlebih dahulu. Proses pengecekan dilakukan dengan perintah:

Grid \longrightarrow Check

Apabila tidak terdapat pesan error pada konsol FLUENT atau nilai minimum volume adalah negatif, maka proses dapat dilanjutkan.

2.4.3 Parameter Solver

Pada menu solverter dapat beberapa parameter yang harus ditentukan, yaitu formulasi solver, ruang model (*space*), waktu (*time*), formulasi kecepatan, pilihan gradien (*gradientoption*), dan formulasi porous. Yang perlu ditentukan untuk simulasi aliran air 3D adalah formulasi solve dan waktu (*time*). Parameter lain dapat dibiarkan sesuai *default*. Gambar 2.10. memperlihatkan menu solver pada FLUENT dan parameter-parameter yang digunakan pada model.



Gambar 2.10. Pemilihan parameter pada menu solver

2.4.4 Formulasi Solver

FLUENT menyediakan tiga formulasi solver, yaitu:

- *Segregated*
- *Coupled* implisit
- *Coupled* eksplisit

Formulasi solver *segregated* dan *coupled* mempunyai perbedaan pada cara penyelesaian persamaan kontinuitas, momentum, dan energi serta persamaan *1Jecies transport* (jika

diperlukan). Solver *segregated* menyelesaikan persamaan-persamaan yang terlibat secara bertahap (terpisah antara satu persamaan dengan persamaan yang lain), sementara solver *coupled* menyelesaikan semua persamaan secara bersamaan. Kedua formulasi solver menyelesaikan persamaan untuk besaran-besaran tambahan (misalnya radiasi, turbulensi) secara bertahap (*sequential*). Solver *coupled implisit* dan eksplisit mempunyai perbedaan pada cara melinearisasi persamaan-persamaan yang akan diselesaikan.

Formulasi solver yang digunakan pada kasus ini adalah *segregated*. Pada formulasi ini, persamaan-persamaan yang digunakan diselesaikan secara bertahap. Oleh karena persamaan-persamaan yang digunakan dalam model tidak linear, diperlukan beberapa kali iterasi untuk menyelesaikan setiap persamaan. Tiap iterasi terdiri dari beberapa langkah, bawah ini:

1. Sifat-sifat fluida diperbarui berdasarkan solusi pada saat itu. Apabila perhitungan baru saja dimulai, sifat-sifat fluida akan diambil berdasarkan solusi awal.
2. Persamaan momentum arah sumbu x , y , dan z diselesaikan secara bergantian dengan menggunakan nilai tekanan dan fluks massa pada saat itu untuk memperbarui medan kecepatan.
3. Kecepatan yang diperoleh mungkin tidak memenuhi persamaan momentum lokal, sehingga diperlukan sebuah persamaan koreksi tekanan yang diturunkan dari persamaan kontinuitas dan persamaan momentum yang telah dilinearisasi. Persamaan koreksi tekanan kemudian diselesaikan untuk memperoleh faktor koreksi yang diperlukan sehingga nilai tekanan, medan kecepatan, dan fluks massa yang diperoleh memenuhi persamaan kontinuitas.
4. Apabila diperlukan, persamaan untuk skalar seperti turbulensi, energi, species, dan radiasi diselesaikan menggunakan nilai variabel lain yang telah diperbaharui.
5. Langkah terakhir adalah pengecekan konvergensi untuk semua persamaan yang digunakan.

2.4.5. Waktu (*Time*)

Pemilihan parameter waktu mengacu pada ketergantungan terhadap waktu. Apabila simulasi yang dilakukan memiliki ketergantungan terhadap waktu, maka perlu dipilih simulasi *unsteady transien*

2.4.6. Model Turbulensi

Aliran turbulen dikenali dengan adanya medan kecepatan yang berfluktuasi. Fluktuasi kecepatan mengakibatkan perubahan berbagai besaran seperti: momentum, energi, konsentrasi partikel. Perubahan mengakibatkan berbagai besaran ikut berfluktuasi. Fluktuasi dapat terjadi pada skala kecil dan mempunyai frekuensi yang tinggi, sehingga terlalu rumit dan berat untuk dihitung secara langsung pada perhitungan teknik praktis meskipun telah menggunakan komputer yang canggih. Oleh karena itu persamaan yang berhubungan dapat dirata-ratakan (*time-averaged, ensemble-averaged*) atau dimanipulasi untuk menghilangkan fluktuasi skala kecil. Dengan demikian persamaan-persamaan yang berhubungan dapat lebih mudah untuk dipecahkan. Bagaimanapun juga, pada persamaan yang telah dimodifikasi terdapat tambahan variabel yang tidak diketahui, dan dibutuhkan model turbulensi untuk menentukannya.

Secara garis besar, model turbulen dapat didekati dengan menggunakan 2 pendekatan, yaitu:

1. Berdasarkan Reynolds Averaged-Navier Stokes (RANS)
2. Berdasarkan Large Eddy Simulation (LES)

Kedua pendekatan sama-sama memerlukan model dengan besaran yang dirata-ratakan (*time-average, ensemble-average*).

Sampai saat ini, belum ada sebuah model turbulensi yang dapat digunakan untuk memecahkan semua kasus aliran turbulen dengan baik. Pemilihan model turbulensi tergantung dari beberapa pertimbangan, antara lain fisik aliran, tingkat akurasi yang diinginkan, sumber daya komputasi yang tersedia, waktu yang

tersedia untuk simulasi. Model turbulensi Reynolds-Stress atau Large-Eddy Simulation tidak mungkin digunakan pada simulasi ini, karena memerlukan daya komputasi yang sangat besar, sedangkan sumber daya komputasi yang tersedia terbatas. Model turbulensi yang mungkin digunakan adalah Spalart-Allmaras, $k-\varepsilon$, atau $k-\omega$. Model turbulensi yang digunakan pada simulasi ini adalah $k-\varepsilon$.

2.4.7. Model $k-\varepsilon$

Model ini merupakan model semi empiris yang dikembangkan oleh Launder & Spalding. Model $k-\varepsilon$ merupakan model turbulensi yang cukup lengkap dengan dua persamaan yang memungkinkan kecepatan turbulen (*turbulent velocity*) dan skala panjang (*lengthscales*) ditentukan secara independen. Kestabilan, ekonomis (dari sisi komputasi), dan akurasi yang memadai untuk berbagai jenis aliran turbulen membuat model $k-\varepsilon$ sering digunakan pada simulasi aliran fluida dan perpindahan kalor.

2.4.8. Kondisi Operasi

Kondisi operasi merupakan salah satu parameter yang harus didefinisikan oleh pengguna FLUENT. Data yang harus dimasukkan pada kondisi operasi adalah tekanan udara sekitar dan percepatan gravitasi.

2.4.9 Kondisi Batas

Kondisi batas merupakan data masukan yang sangat penting untuk simulasi aliran dengan FLUENT. Kondisi batas yang digunakan harus merupakan parameter aliran yang dapat dipercaya nilainya. Secara garis besar pemodelan saluran terbuka terdiri dari beberapa kondisi batas, yaitu:

a. Velocity Inlet

Lokasi kondisi batas ini berada pada sisi masuk daerah saluran. Nilai masukan yang dibutuhkan adalah

kecepatan aliran air, arah aliran, dan sifat turbulensi. Pada kondisi batas ini, kecepatan masuk aliran akan selalu tetap sepanjang iterasi.

b. Mass Flow Inlet

Untuk fluida inkompresibel, sebenarnya kondisi batas ini hampir sama dengan *velocity inlet*. Laju aliran massa merupakan perkalian antara kecepatan, luas penampang, dan massa jenis fluida. Pada kondisi batas ini diperlukan nilai masukan berupa laju aliran massa fluida, tekanan statik gage, arah aliran, dan sifat turbulensi. Laju aliran massa akan selalu tetap sebesar nilai masukan sepanjang simulasi. Nilai tekanan statik nantinya akan dikoreksi oleh FLUENT sehingga dapat berbeda dari nilai awalnya.

c. Pressure Outlet

Kondisi batas ini dipakai pada sisi keluar fluida. Kondisi batas ini dipilih apabila nilai tekanan statik pada sisi keluaran diketahui atau minimal dapat diperkirakan mendekati nilai sebenarnya. Pada kondisi batas ini diperlukan nilai masukan berupa tekanan statik, arah aliran, dan besaran turbulensi. Tekanan statik merupakan acuan pada bidang batas yang dipilih. Oleh karena itu, nilai tekanan statik akan selalu tetap selama iterasi transient.

d. Pressure Inlet

Nilai tekanan total merupakan acuan pada kondisi batas ini. Tekanan total yang dimaksud adalah penjumlahan tekanan statik dan tekanan dinamik (faktor kecepatan). Formulasi tekanan total adalah sebagai berikut:

$$p_0 = p_s + \frac{1}{2} \rho |v|^2 \dots\dots\dots (2.7)$$

Dengan menggunakan kondisi batas ini, tekanan total akan memiliki nilai yang tetap sepanjang simulasi transient. Namun demikian, bagian dari tekanan total (tekanan statik dan dinamik) dapat berubah sebagai fungsi yang berbanding terbalik antara satu dengan yang lainnya.

e. Outflow

Kondisi batas ini digunakan apabila para meter aliran pada keluaran sama sekali tidak diketahui. Kondisi batas ini hanya dapat digunakan untuk fluida inkompresibel dengan aliran berkembang penuh (*fullydeveloped*). Kondisi batas ini tidak dapat digunakan bersamaan dengan *pressure outlet* atau *pressure inlet*.

f. Wall

Seluruh dinding yang terdapat pada saluran (termasuk katup dan sudu) didefinisikan sebagai dinding. Tidak ada nilai yang harus dimasukkan pada kondisi batas ini apabila dinding tidak bergerak terhadap waktu. Namun, apabila dinding bergerak terhadap waktu, maka perlu untuk memasukkan kecepatan putar, sumbu putaran, dan titik asal putaran.

g. Continuum

Kontinum (volume yang dilewati aliran) harus didefinisikan. Jenis fluida dari kontinum dipilih berdasarkan fluida yang mengalir. Untuk kasus kontinum yang berputar terhadap waktu (misalnya: kasus *sliding mesh*), maka titik asal putaran, arah putaran, dan besarnya kecepatan putar merupakan nilai yang harus dimasukkan.

2.4.10. Iterasi

Iterasi adalah perhitungan dengan metoda coba-coba yang dilakukan berulang kali. FLUENT akan memulai perhitungan

setelah inisialisasi aliran (fluida mulai dialirkan). Iterasi akan terus dilakukan hingga tercapai konvergensi atau batas jumlah iterasi yang ditetapkan.

Konvergen berarti parameter aliran pada batas-batas aliran yang ada sudah mendekati nilai kondisi batas yang ditetapkan sebelumnya. Skala konvergensi pada FLUENT diterjemahkan dalam bentuk residual. *Default* nilai residual maksimum pada FLUENT adalah 0,001. Nilai residual dapat diubah oleh pengguna. Semakin kecil nilai residual, maka model aliran akan semakin mendekati keadaan sebenarnya. Akan tetapi jumlah iterasi yang diperlukan juga semakin banyak.

2.5 Model Numerik Simulasi *Non Premix Combustion*

Mixture fraction

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}}$$

$$f_{fuel} + f_{sec} + f_{ox} = 1$$

Transport equations for the mixture fraction

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \bar{u} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m + S_{user}$$

The β function PDF

$$p(f) = \frac{f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1} df}$$

$$\alpha = \bar{f} \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}^2} - 1 \right]$$

$$\beta = (1-\bar{f}) \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}^2} - 1 \right]$$

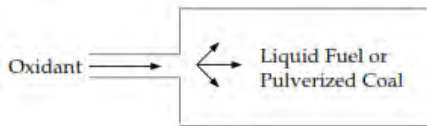
Non adiabatic extensions of the non premix model

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{H}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \overline{H}) = \nabla \cdot \left(\frac{k_t}{c_p} \nabla \overline{H} \right) + S_h$$

When secondary included

$$\overline{\phi_i} = \int_0^1 \int_0^1 \phi_i(f_{\text{fuel}}, p_{\text{sec}}, \overline{H}) p_1(f_{\text{fuel}}) p_2(p_{\text{sec}}) df_{\text{fuel}} dp_{\text{sec}}$$

Untuk pembakaran *non premix* dengan saluran udara dan bahan bakar sama dimodelkan dengan *dispersed phase*



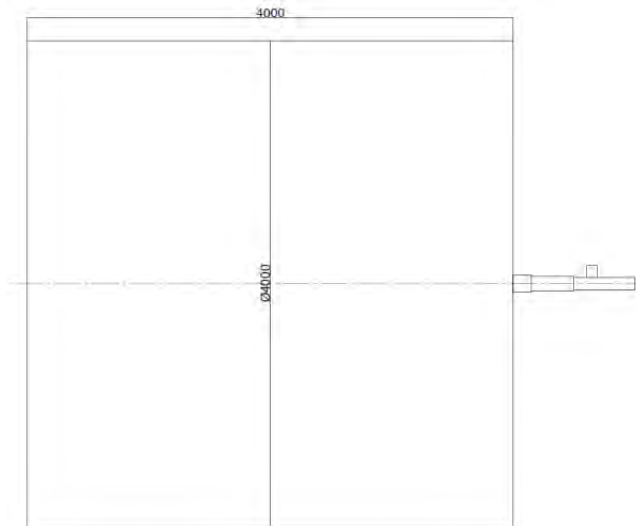
BAB III

METODE PENELITIAN

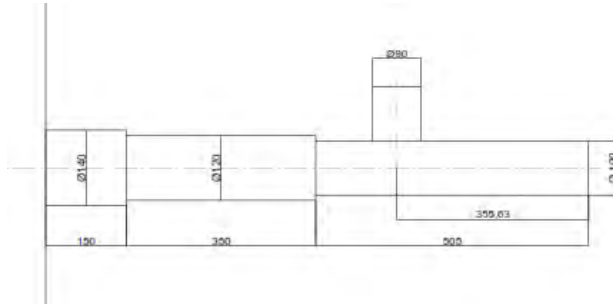
Bab ini akan membahas mengenai metode penelitian yang digunakan mulai dari pembuatan model geometri dari *Burner Hybrid* dengan menggunakan *software GAMBIT 2.4.6*. Pemodelan menggunakan *software Ansys Fluent 14.0* beserta langkah-langkahnya sampai diagram alir penelitian.

3.1 Objek Penelitian

Penelitian ini memiliki fokus analisa tentang karakteristik pembakaran dengan dimensi sesuai dengan dimensi *burner* yang digunakan pada eksperimen Rancang Bangun Burner Hybrid dan dimensi secara lengkap sebagai berikut:



Gambar 3.1. geometri open chamber burner



Gambar 3.2. geometri burner

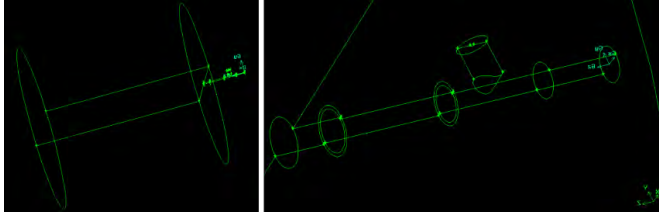
Penelitian ini memiliki fokus analisa tentang karakter pembakaran dan akan dianalisa secara numerik dengan menggunakan *software Ansys Fluent 14.0*. Karakter pembakaran antara lain yaitu besar temperatur, kecepatan dan emisi gas buang (CO_2 , O_2 , dan NO_x) akibat pengaruh dari panjang extension chamber burner. Panjang extension chamber yang digunakan adalah 75 mm dan 150 mm.

3.2 Pembuatan Model Uji Pada *Software GAMBIT*

Model burner dibuat di awal untuk menentukan batas kerja sistem. Model digambar pada *software GAMBIT 2.4.6 (Geometry And Mesh Building Intelegant Toolkit)* sebelum model ini diekspor ke *software Ansys Fluent 14.0*. Langkah-langkah pemodelan di dalam file kerja *GAMBIT 2.4.6* akan diulas leebih lanjut sebagai berikut:

3.2.1 Membuat Model Geometri

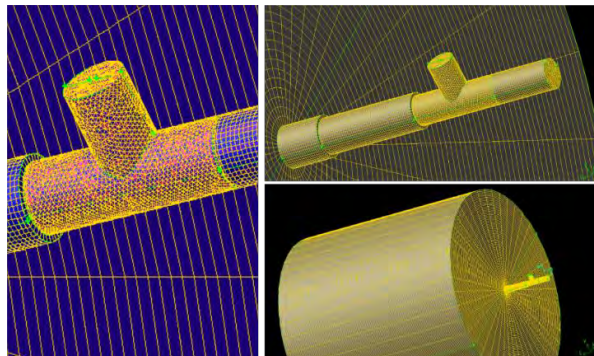
Pembuatan model geometri burner dengan menggunakan *GAMBIT* yaitu membuat volume *combuster*, *chamber* dan *open chamber* kemudian digabungkan menjadi satu volume.



Gambar 3.3 burner dengan panjang extension chamber 150 mm di *software GAMBIT 2.4.6*

3.2.2 Menyusun Elemen Meshing

Model geometri burner yang dibangun akan dibagi menjadi elemen-elemen kecil. Bentuk, ukuran dan jumlah elemen yang dibutuhkan ditentukan sesuai kebutuhan untuk mendapatkan hasil yang akurat dan baik. Bentuk *meshing* yang dipilih adalah *hex/wedge* untuk semua daerah kecuali untuk daerah *combuster* yang dipilih adalah *tet/hybrid* karena geometrinya yang berupa percabangan.



Gambar 3.4 Hasil meshing obyek

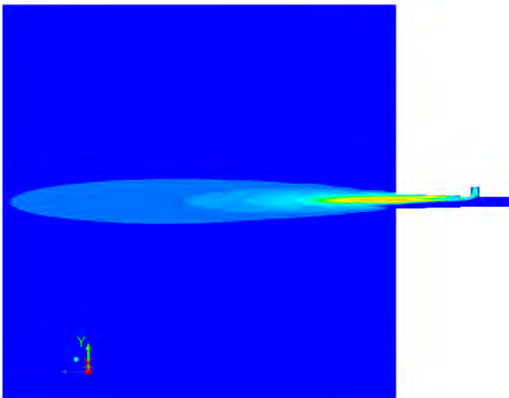
3.2.3 Grid Indenpendency

Dilakukan grid indenpendency dengan membuat tiga kerapatan meshing yang berbeda yaitu meshing dengan aspect ratio besar, aspect ratio sedang dan dan aspect ratio kecil.

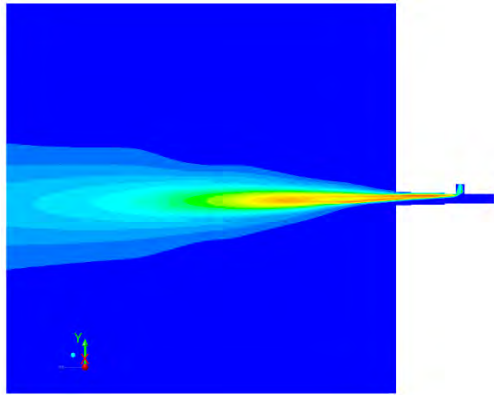
Tabel 3.1 data *Grid Indenpendency* pada geometri *extension pipe* 150 mm

Aspect Ratio	Jumlah meshing	Equisize Skew
Besar	319.224	0,824
Sedang	498.147	0,746
kecil	765.655	0,771

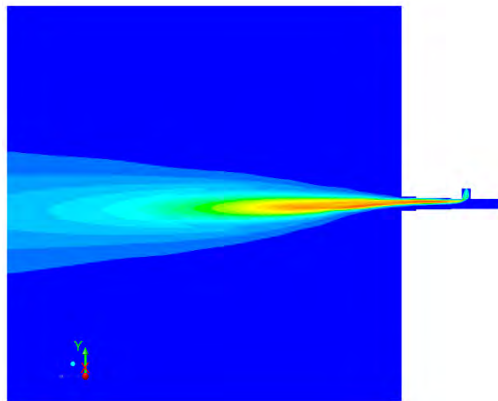
Hasil dari Grid Indenpendency



Gambar 3.5 meshing dengan aspek rasio besar



Gambar 3.6 meshing dengan aspek rasio besar

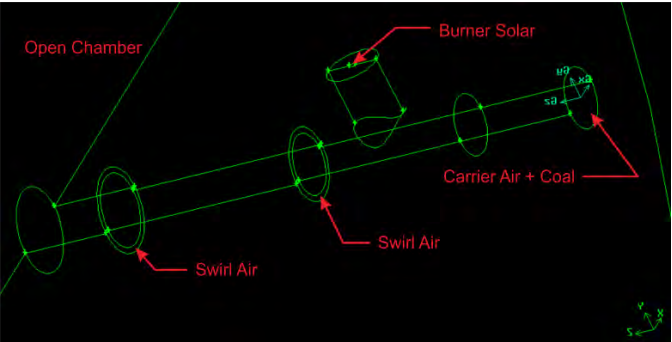


Gambar 3.7 meshing dengan aspek rasio besar

Dipilih meshing dengan aspect ration sedang karena pada aspect ratio besar nilai yang didapat terlalu jauh, sedangkan pada aspect ratio sedang dan kecil nilai yang didapat mendekati jadi dipilih meshing dengan aspect ratio sedang.

3.24 Boundary Condition

Kondisi batas serta jenis kondisi batas yang diinginkan akan ditentukan pada tahap ini. Kondisi batas untuk *shell, tube, baffle* berupa *wall* sedangkan *inlet* berupa *mass flow* dan *outlet* berupa *pressure outlet*.



Gambar 3.8 *Boundary condition* model uji

Tabel 3.1 . Nama *Boundary Condition* Pemodelan Sistem dan Tipenya

Nama <i>Boundary Condition</i>	Tipe	Keterangan
<i>Carrier Air</i>	<i>Mass Flow Inlet</i>	$\dot{m}_{Coal} : 0,084 \text{ kg/s}$ $T \text{ vaporation} : 900^{\circ} \text{ C}$ $\dot{m}_{Air} : 0,14 \text{ kg/s}$ $P : 0.004 \text{ atm}$
<i>Burner Solar</i>	<i>Mass Flow Inlet</i>	$\dot{m}_{Solar} : 5 \text{ kg/h} = 0,001389 \text{ kg/s}$ $\dot{m}_{Air} : 50,8 \text{ kg/h} = 0,0222 \text{ kg/s}$ $P : 0.04 \text{ atm}$

Swirl Air	<i>Mass Flow Inlet</i>	\dot{m}_{Air} : 0,0764 kg/s; 0,0607 kg/s; 0,0468 kg/s P : 0.008 atm Sudut aliran: 60°
Open Chamber	<i>Pressure Outlet</i>	P : 1 atm

3.3 Prosedur Penelitian

Langkah-langkah pengerjaan Fluent akan dijelaskan secara detail untuk mempermudah perhitungan.

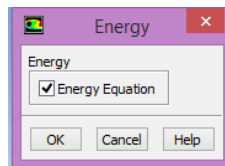
3.3.1 Grid

1. **File>read>mesh** Kontruksi yang telah dibuat di gambit akan dibaca di fluent dengan ekstensi .msh
2. mengecek grid, **general>check** untuk memeriksa minimum dan maksimum dari nilai x dan y dari grid
3. menskalakan grid, **general>scale** pilih unit mm agar sesuai kontruksi awal

3.3.2 Models

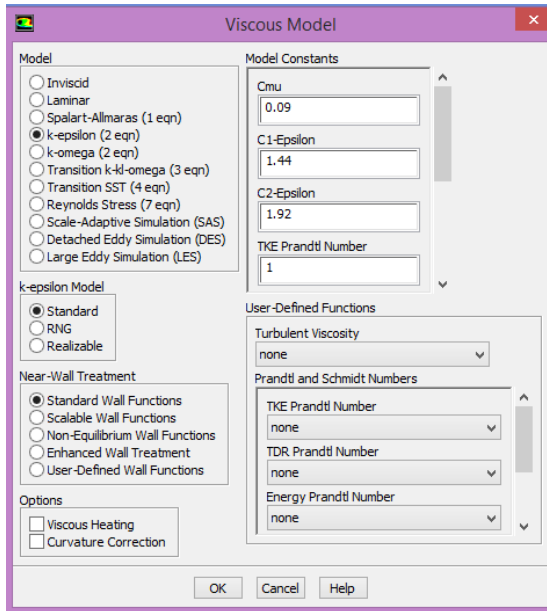
1. mengaktifkan persamaan energy untuk mengaktifkan perpindahan panas

Models>energy



Gambar 3.9 mengaktifkan model *energy*

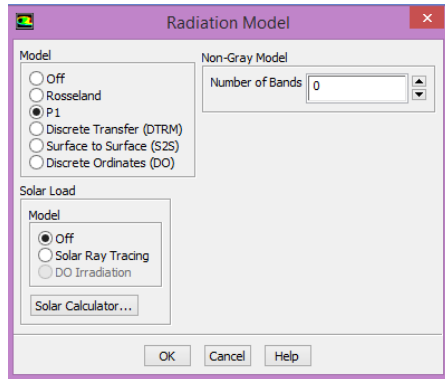
2. mengaktifkan model turbulensi

Models>viscous>k-epsilon (2eqn)

Gambar 3.10 *viscous model* untuk mengaktifkan persamaan k-epsilon (2eqn)

3. mengaktifkan perpindahan panas secara radiasi

Models>Radiation

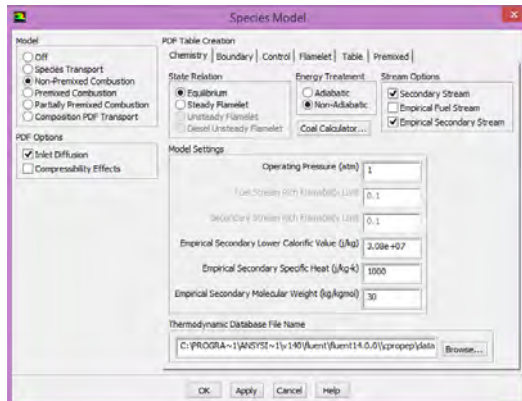


Gambar 3.8 radiation model

4. mengaktifkan spesies kimia reaksi dan perpindahan

Dalam simulasi ini untuk oil burner tidak bisa dimodelkan sebagai pembakaran premix.

Models>species>non-premix



Gambar 3.11 memilih jenis non-premix pada species model

5. menginputkan propertis *coal* pada Coal Calculator

Data propertis yang akan diinputkan ke coal calculator di dapatkan dari PT. PJB Unit Pembangkit.

Tabel 3.2 Data parameter - parameter batubara dari PT.PJB Unit Pembangkitan Paiton

Parameters	Unit	Results			Standard Methods
		As Received Basis	Air Dried Basis	Dry Basis	
Total Moisture	%	26.37	-	-	ASTM D3302M-10
Moisture in The Analysis Sample	%	-	13.22	-	ASTM D3173-11
Ash Content	%	4.31	5.08	5.85	ASTM D3174-11
Carbon	%	51.12	60.25	69.43	ASTM-D5373-2008
Hydrogen	%	3.12	3.68	4.24	ASTM-D5373-2008
Nitrogen	%	0.98	1.16	1.34	ASTM-D5373-2008
Total Sulphur	%	0.31	0.37	0.43	ASTM D4239-11
Oxygen by difference	%	13.78	16.24	18.71	ASTM D3176-09

Data yang diinputkan ke dalam *coal calculator* berdasarkan nilai *As Recived Basis* dalam bentuk desimal.

The screenshot shows the 'Coal Calculator' window with the following data entered:

Proximate Analysis		Ultimate Analysis (DAF)	
Volatile	0.451753	C	0.737556
Fixed Carbon	0.271052	H	0.045015
Ash	0.038941	O	0.198817
Moisture	0.238254	N	0.014139
		S	0.004473

Mechanism
☒ Secondary Stream

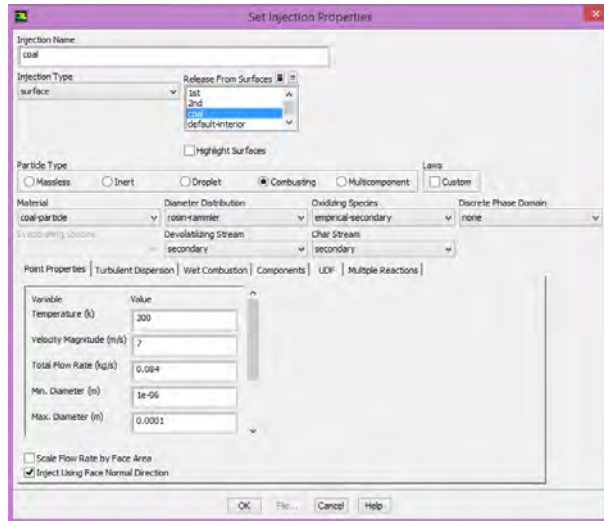
Settings

Coal Particle Material Name	coal-particle
Coal As-Received HCV (J/kg)	2.4e+07
Volatile Molecular Weight (kg/kgmol)	30
CO/CO2 Split in Reaction 1 Products	1
High Temperature Volatile Yield	1
Fraction of N in Char (DAF)	0.7

Buttons at the bottom: OK, Apply, Cancel, Help.

Gambar 3.12. menginputkan nilai propertis batubara dalam *coal calculator*

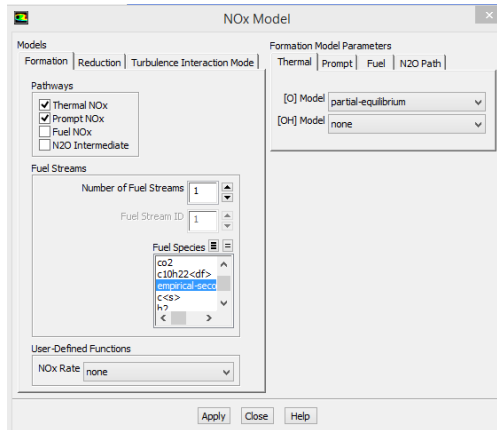
6. mengaktifkan coal partikel

Models>Discrete Phase>injection

Gambar 3.13 set injection properties

7. mengaktifkan Pollutan NO

Models>Nox , pilih thermal NOx dan Prompt NOx dan fuel species pilih empirical secondary



Gambar 3.13 mengaktifkan Pollutan NO

3.3.3 Materials

Pada tahap ini tidak perlu menentukan jenis material dikarenakan material sudah diinput pada boundary species non premix.

3.4 Validasi

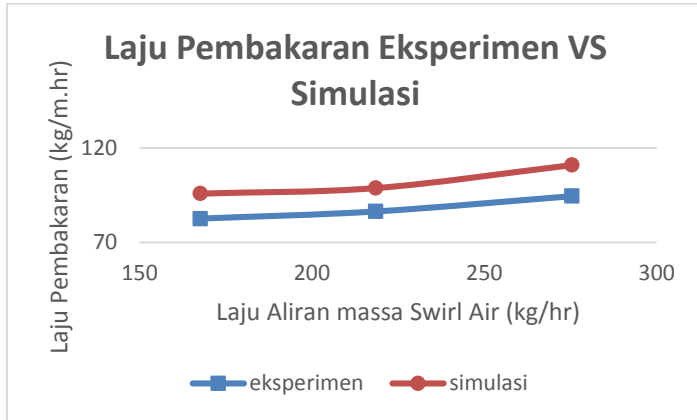
Tahap validasi merupakan tahap membandingkan hasil running CFD terhadap data eksperimen atau empiris. Data validasi didapatkan dari hasil eksperimen, data yang akan dibandingkan yaitu data laju pembakaran antara hasil eksperimen dengan hasil simulasi.

Tabel 3.3 Panjang nyala api dan Laju pembakaran secara eksperimen

Laju aliran massa <i>Carrying Air</i>	Laju aliran massa Batubara	Laju aliran massa <i>Swirler Air</i>		Panjang Nyala (horizontal)	Laju Pembakaran per
(kg/hr)	(kg/hr)	kg/s	(kg/hr)	L (m)	Panjang nyala api (kg/m.hr)
536,040	300,626	0,077	275,431	3,18	94,536
		0,061	218,511	3,48	86,387
		0,047	167,621	3,64	82,590

Tabel 3.4 Panjang nyala api dan Laju pembakaran secara simulasi *Ansys Fluent*

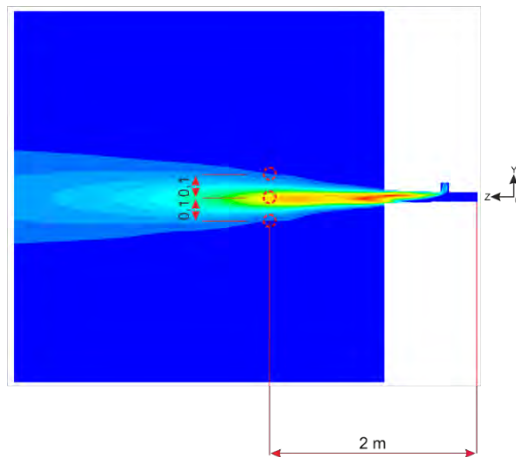
Laju aliran massa <i>Carrying Air</i>	Laju aliran massa Batubara	Laju aliran massa <i>Swirler Air</i>		Panjang Nyala (horizontal)	Laju Pembakaran per Panjang nyala api	Volume nyala api	Laju Pembakaran per Volume nyala Api
(kg/hr)	(kg/hr)	(kg/s)	(kg/hr)	L (m)	(kg/m.hr)	m ³	(kg/m ³ .hr)
536,040	300,626	0,077	275,431	3,07	110,98	0,057107	5264,26
		0,061	218,511	3,38	98,806	0.046308	6491,88
		0,047	167,621	3,56	95,87	0,054529	5513,14



Gambar 3.14 Grafik Laju pembakaran Eksperimen vs laju pembakaran simulasi

3.4 Metode Pengambilan Data *Mass Fraction*

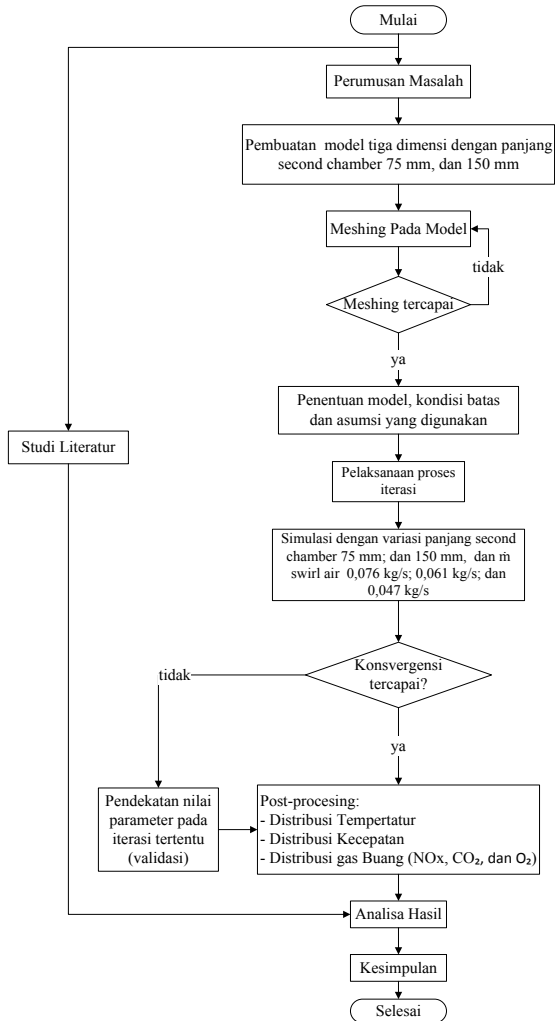
Untuk pengambilan data mass fraction gas buang (O_2 , CO_2 dan NO) pembakaran dengan cara pengambilan pada beberapa titik pada profil kontur untuk mengetahui mass fraction yang dibutuhkan maupun yang dihasilkan.



Gambar 3.12 titik pengambilan *mass fraction* gas buang

3.6 Flowchart Penelitian

Suatu kerangka atau diagram alir (flowchart) dari tahapan penelitian dapat mempermudah proses penelitian dan simulasi yang akan dilakukan, menggambarkan flowchart dari tahapan penelitian mengenai simulasi pembakaran pulverized coal dan bahan bakar solar di dalam *burner*.



BAB IV

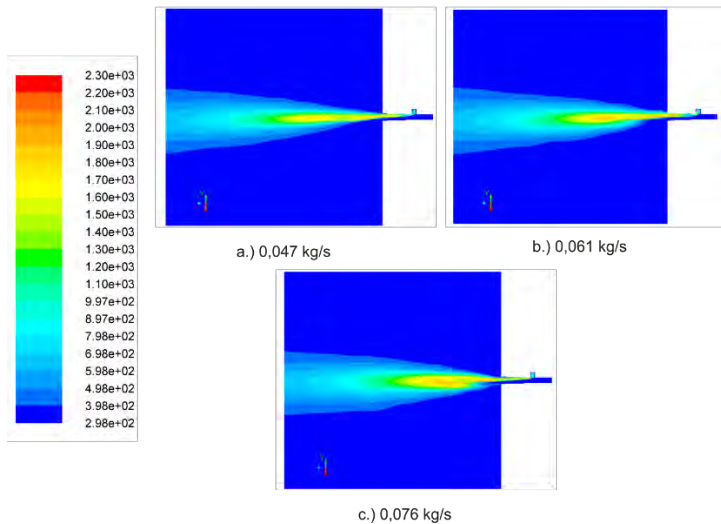
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Setelah melakukan iterasi dan mencapai konvergensi, akan dilakukan analisa. Beberapa visualisasi yang akan ditampilkan berupa kontur temperatur, kecepatan, dan polutan (CO_2 , O_2 dan NO_x) pada burner dengan memvariasikan *extension pipe* sepanjang 75 mm. Pada hasil analisa data kali ini ada beberapa kondisi yang telah ditentukan yaitu laju aliran massa *swirl air* yang divariasikan sebesar 0,0764 kg/s; 0,0607 kg/s dan 0,0468 kg/s, Temperatur dinding dianggap konstan sebesar 300 K, dan tekanan outlet yang diasumsikan sebesar 1 atm.

4.1. Analisa Pada Kontur Temperatur

Pada tampilan visual kontur temperatur, diambil sampel panjang *extension pipe* 75 mm pada tiap nilai laju aliran massa *swirl air* sebab sebagian besar pada variasi panjang *extension pipe* yang lain memiliki bentuk kontur yang tidak jauh berbeda atau bisa diasumsikan sama..

skala gambar : 10 mm = 1 m



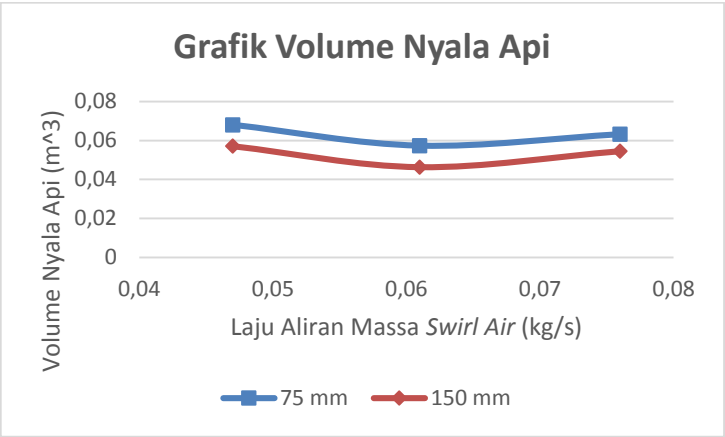
Gambar 4.1. Kontur temperatur untuk variasi *extension pipe* dan laju aliran massa *swirl air*

Dari kontur temperatur pada gambar 4.1. dapat dilihat bahwa terjadi perubahan warna temperatur setelah melewati saluran *oil*

burner, kenaikan warna kontur tertinggi pada saat batubara berada pada combustion pipe, kemudian warna kontur temperatur kembali turun setelah melewati extension pipe. Kontur temperatur kembali naik tetapi tidak lebih tinggi dari warna kontur pada saat di pipe, kontur yang sama ditunjukkan pada setiap variasi panjang extension pipe. Adapun perbedaan diantara variasi laju aliran massa *swirl air* dimana semakin besar laju aliran massa *swirl air* maka nyala api semakin pendek dan volume api semakin kecil.

Tabel 4.1. Data hasil iterasi temperatur dari variasi *extension pipe* terhadap laju aliran massa.

	Volume Nyala Api (m ³)		
	Laju Aliran massa Swirl Air (kg/s)		
Extension Pipe (mm)	0,047	0,061	0,076
75	0,068026	0,057386	0,063238
150	0,057107	0,046308	0,054529



Gambar 4.2. Grafik *Volume Nyala Api* dari variasi laju aliran massa.

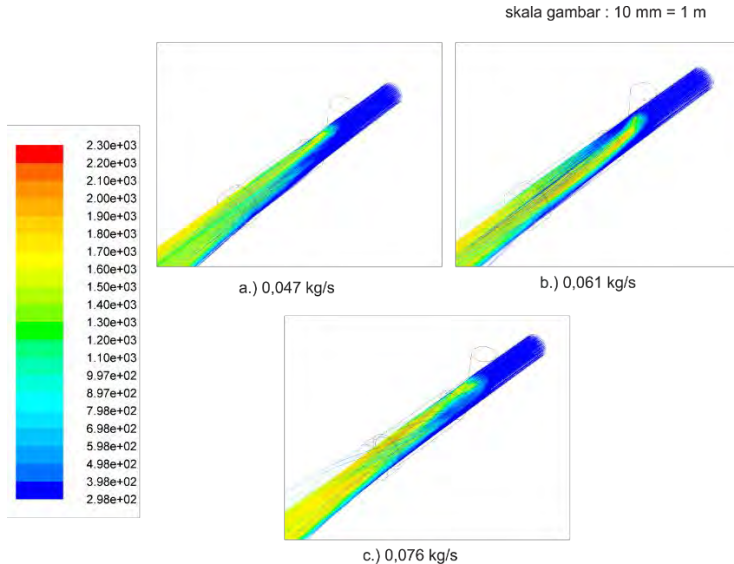
Dari trend grafik pada gambar 4.2. yang diambil dari data pada tabel 4.1. dapat kita lihat trendline untuk extension 75 mm berada paling atas dimana dengan laju aliran massa swirl air 0,047 kg/s volume nyala api 0,068026 m³ , trendline turun dengan penambahan

laju aliran massa swirl air 0,067 kg/s dengan volume nyala api 0,057386 m³ dan trendline kembali naik saat laju aliran massa swirl air 0,076 kg/s dengan volume nyala api 0,063238 m³. Untuk trendline extension pipe 150 mm memiliki trend yang sama dengan extension pipe 75 mm dimana pada laju aliran massa swirl air 0,047 kg/s menghasilkan volume nyala api 0,057107 m³, trend menjadi turun menjadi 0,046308 m³ saat diberikan laju aliran massa sebesar 0,061 kg/s dan trend kembali naik menjadi 0,054529 m³ pada laju aliran swirl air 0,076 kg/s.

Hal ini menunjukkan bahwa dengan bertambahnya laju aliran massa *swirl air* dapat membuat volume nyala api menjadi lebih kecil, akan tetapi penambahan laju aliran massa swirl air memiliki penambahan yang paling optimum saat laju aliran massa sebesar 0,061 kg/s. Volume nyala api kembali membesar jika diberikan laju aliran massa melebihi 0,061 kg/s disebabkan adanya gaya sentrifugal yang besar sehingga partikel batubara terlempar keluar dan menyebabkan volume api yang lebih besar.

4.2. Analisa Pada *Particle Tracks Coal* Berdasarkan Warna Temperatur

Pada tampilan visual *Particle Tracks Coal*, diambil sampel panjang extension pipe 75 mm pada tiap nilai laju aliran massa *swirl air* sebab sebagian besar pada variasi panjang extension pipe yang lain memiliki bentuk kontur yang tidak jauh berbeda atau bisa diasumsikan sama.



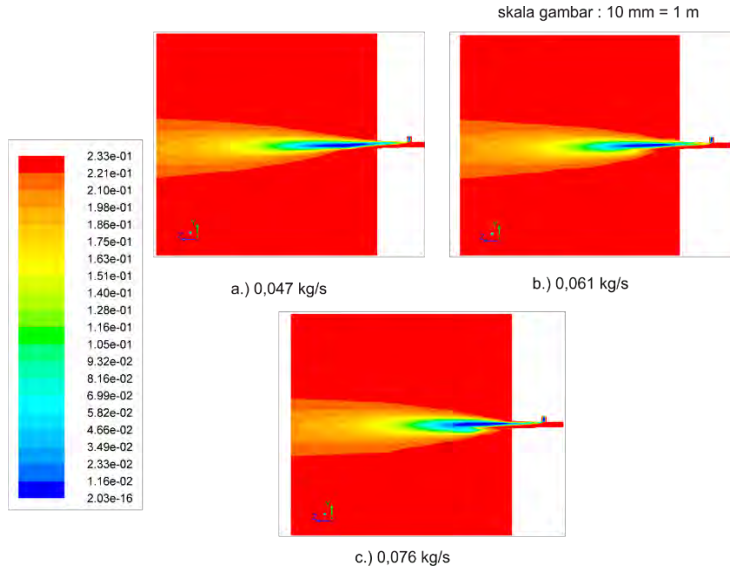
Gambar 4.3. Particle tracks coal berdasarkan warna temperatur

Dari kontur total temperatur pada gambar 4.3. dapat kita lihat partikel batubara mengalami kenaikan temperatur pada combustion chamber, warna temperatur terlihat terpelintir dan menjadi lebih tinggi saat terpelintir pada combustion chamber. Dapat dilihat temperatur lebih tinggi untuk tiap penambahan laju aliran massa dan dapat dilihat semakin banyak partikel batubara yang terlempar dari nyala api dikarenakan penambahan laju aliran massa *swirl air*.

Adanya udara masuk dengan sudut 60° menyebabkan udara dapat masuk kedalam nyala api lebih cepat, laju pembakaran yang paling optimum pada variasi laju aliran massa *swirl air* 0,067 kg/s, penambahan laju aliran massa *swirl air* diatas 0,067 kg/s menyebabkan banyak partikel batubara yang keluar dari nyala api.

4.3. Analisa Pada Kontur Mass Fraction O_2

Pada tampilan visual kontur *mass fraction O_2* , diambil sampel panjang extension pipe 75 mm pada tiap nilai laju aliran massa *swirl air* sebab sebagian besar pada variasi panjang extension pipe yang lain memiliki bentuk kontur yang tidak jauh berbeda atau bisa diasumsikan sama.



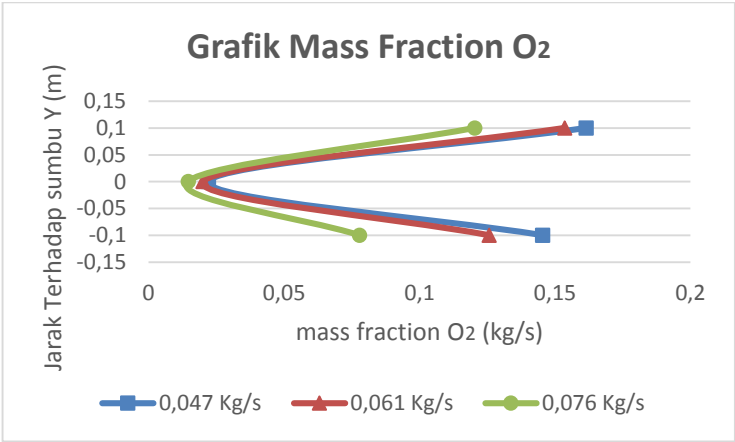
Gambar 4.4. Kontur *species* O₂ extension pipe 75 mm

Dari kontur total temperatur pada gambar 4.4. (a), (b) dan (c). dapat dilihat terdapat sejumlah gradasi warna sepanjang *burner* sampai *open chamber*. Kontur warna O₂ saat sebelum melewati *oil burner* tinggi namun setelah melewati *oil burner* kontur warna mass fraction O₂ mulai turun dibagian atas dan semakin turun saat memasuki *combustion chamber* hingga *open chamber* dan kontur warna O₂ kembali naik setelah menjauh keluar dari *burner*. Penurunan warna kontur mass fraction O₂ menunjukkan terjadinya proses pembakaran dimana O₂ sebagai oksidator dalam pembakaran batubara.

Untuk grafik mass fraction O₂ hanya ditampilkan pada extension pipe 75 mm dengan variasi laju aliran massa swirl air 0,047 kg/s; 0,061; dan 0,076 kg/s sebab konsumsi O₂ untuk tiap variasi extension pipe memiliki trend yang sama.

Tabel 4.2. Data *mass fraction* O₂ pada extension pipe 75 mm

	Mass Fraction O2 (kg/kg)		
	Jarak terhadap sumbu Y (m)		
Laju Aliran Massa (kg/s)	0,1	0	-0,1
0,047 Kg/s	0,161525	0,022112	0,145488
0,061 Kg/s	0,153561	0,020105	0,125679
0,076 Kg/s	0,120330	0,014563	0,077895



Gambar 4.5. Grafik *mass fraction* O₂ terhadap kontur laju pembakaran

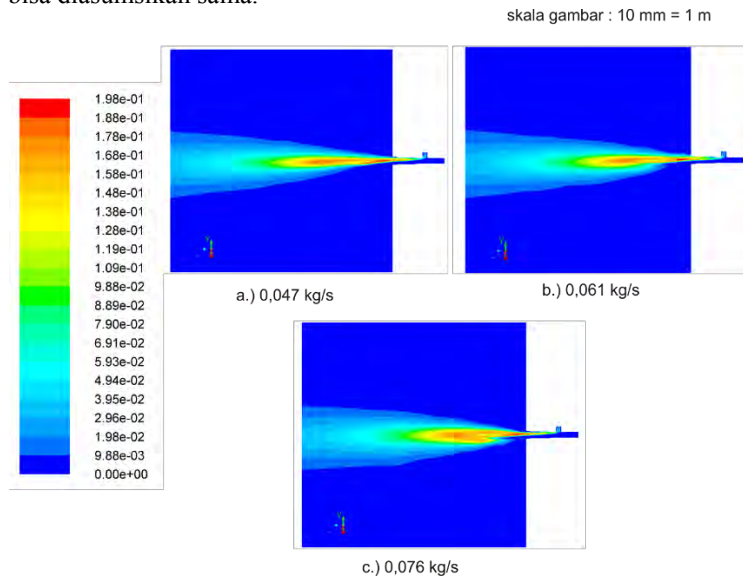
Dari trend grafik pada gambar 4.5. yang diambil dari data pada tabel 4.2. dapat kita lihat bahwa trendline untuk variasi laju aliran massa swirl air 0,076 kg/s memiliki nilai *mass fraction* paling kecil dari jarak 0,1 m *mass fraction* O₂ sebesar 0,120330 kg/kg ke jarak 0 m *mass fraction* O₂ 0,014563 kg/kg trend bergeser ke kiri menunjukkan bahwa semakin masuk ke dalam nyala api nilai *mass fraction* O₂ semakin berkurang. Trendline mulai bergeser kembali ke kanan pada jarak -0,1 m *mass fraction* O₂ 0,145488 kg/kg menunjukkan pada bagian luar api ada batubara yang masih belum terbakar.

Masuknya O₂ kedalam api disebabkan adanya reaksi difusi antara kosentrasi O₂ pada open chamber yang tinggi ke dalam nyala

api yang memiliki konsentrasi O_2 lebih rendah. Dapat dilihat dengan penambahan laju aliran massa swirl air pembakaran yang lebih baik pada laju aliran massa swirl air 0,076 kg/s karena mass fraction O_2 lebih sedikit atau bisa dibilang batubara yang terbakar lebih banyak.

4.4. Analisa Pada Kontur Mass Fraction CO_2

Pada tampilan visual kontur dari *mass fraction* CO_2 , diambil sampel panjang extension pipe 150 mm pada tiap nilai laju aliran massa *swirl air* sebab sebagian besar pada variasi panjang extension pipe yang lain memiliki bentuk kontur yang tidak jauh berbeda atau bisa diasumsikan sama.



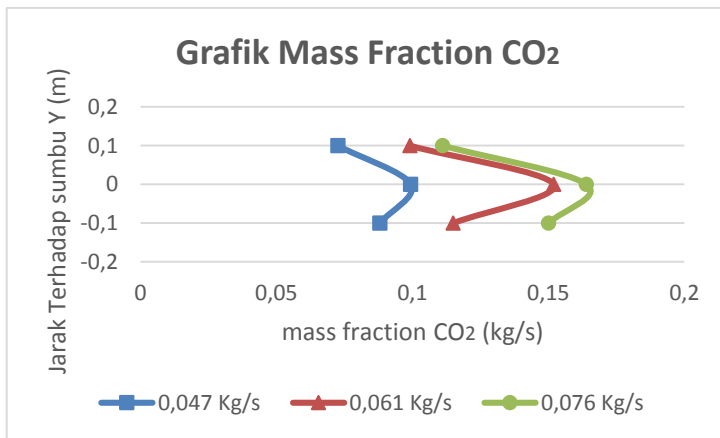
Gambar 4.6. Kontur *mass fraction* CO_2 extension pipe 75 mm

Dari kontur total temperatur pada gambar 4.6. (a), (b) dan (c). dapat dilihat terdapat sejumlah gradasi warna sepanjang *burner* sampai *open chamber*. Kontur warna CO_2 saat sebelum melewati *oil burner* rendah namun setelah melewati *oil burner* kontur warna mass fraction CO_2 mulai tinggi dibagian atas dan semakin tinggi saat memasuki *combustion chamber* hingga *open chamber* dan kontur warna CO_2 kembali rendah setelah menjauh keluar dari *burner*. kenaikan warna kontur mass fraction CO_2 menunjukkan terjadinya

proses pembakaran dimana CO_2 hasil sisa dalam pembakaran batubara.

Tabel 4.3. Data *mass fraction* CO_2 pada extension pipe 75 mm dengan variasi laju aliran massa.

	Mass Fraction CO_2 (kg/kg)		
	Jarak terhadap sumbu Y (m)		
Laju Aliran Massa (kg/s)	0,1	0	-0,1
0,047 Kg/s	0,072639	0,0994177	0,088052
0,061 Kg/s	0,09911	0,151941	0,115004
0,076 Kg/s	0,111173	0,164016	0,150065



Gambar 4.7. Grafik *mass fraction* CO_2 dari variasi laju aliran massa.

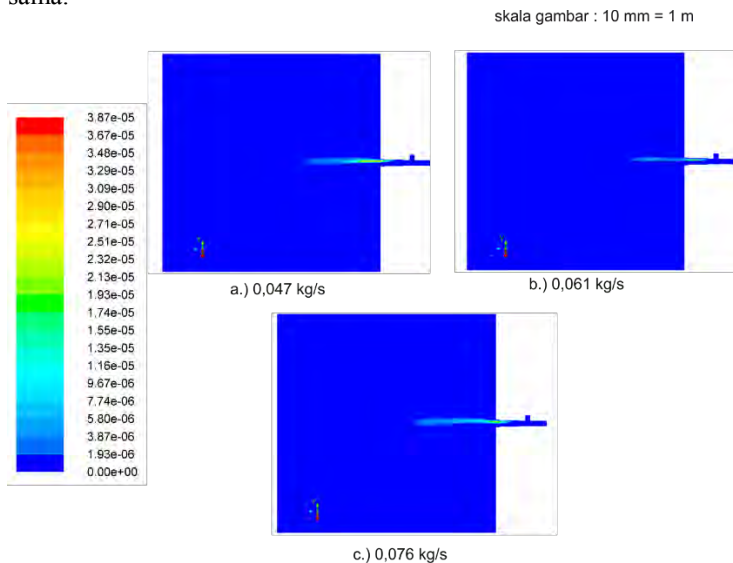
Dari trend grafik pada gambar 4.7. yang diambil dari data pada tabel 4.3. dapat kita lihat bahwa trendline untuk variasi laju aliran massa swirl air 0,076 kg/s memiliki nilai mass fraction paling besar dari jarak 0,1 m mass fraction CO_2 sebesar 0,111173 kg/kg ke jarak 0 m mass fraction CO_2 0,164016 kg/kg trend bergeser ke kanan menunjukkan bahwa semakin masuk ke dalam nyala api nilai mass fraction CO_2 semakin bertambah. Trendline mulai bergeser kembali ke kiri pada jarak -0,1 m mass fraction CO_2 0,150065 kg/kg

menunjukkan pada bagian luar api ada batubara yang masih belum terbakar.

timbulnya CO_2 dikarenakan CO_2 merupakan hasil sisa pembakaran batubara. Mass fraction CO_2 paling banyak menandakan pembakaran yang lebih baik, dalam hal ini pembakaran dengan laju aliran swirl air 0,076 kg/s.

4.5. Analisa Pada Kontur Mass Fraction Pollutan NO

Pada tampilan visual kontur dari *Pollutant NO*, diambil sampel panjang extension pipe 150 mm pada tiap nilai laju aliran massa *swirl air* sebab sebagian besar pada variasi panjang extension pipe yang lain memiliki bentuk kontur yang tidak jauh berbeda atau bisa diasumsikan sama.



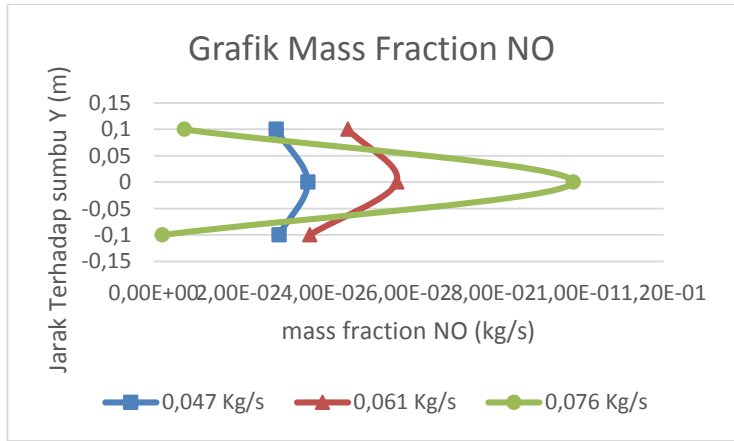
Gambar 4.8. Kontur *mass fraction pollutant NO* extension pipe 75 mm

Dari kontur *pollutant NO* pada gambar 4.8. dapat dilihat terdapat kontur warna *pollutant NO* sepanjang combustion chamber sampai *open chamber* berbentuk pipih memanjang. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat pengaruh laju aliran massa swirl air terhadap kesempurnaan pembakaran. Kontur warna Pollutan NO paling tinggi pada laju aliran massa swirl air 0,047 kg/s, pada laju aliran massa

0,061 kg/s kontur warna menurun menunjukkan penambahan optimal laju aliran massa swirl air pada 0,061 kg/s, dan nilai kontur warna Pollutan NO kembali naik pada laju aliran massa 0,076 kg/s.

Tabel 4.4. Data *mass fraction* Pollutant NO pada extension pipe 75 mm.

	Mass fraction Pollutan NO (kg/kg)		
	Jarak terhadap sumbu Y (m)		
Laju Aliran massa (kg/s)	0,1	0	-0,1
0,047 Kg/s	2,88E-02	3,62E-02	2,95E-02
0,061 Kg/s	4,57E-02	5,72E-02	3,67E-02
0,076 Kg/s	7,16E-03	9,87E-02	2,02E-03



Gambar 4.9. Grafik mass fraction Pollutan NO dari variasi laju aliran massa.

Dari trend grafik pada gambar 4.9. yang diambil dari data pada tabel 4.4. dapat kita lihat bahwa trendline untuk variasi laju aliran massa *swirl air* 0,076 kg/s memiliki nilai mass fraction paling besar untuk jarak 0,1 m mass fraction NO sebesar 7,16E-03 kg/kg ke jarak 0 m mass fraction NO 9,87E-02 kg/kg trend bergeser ke kanan menunjukkan bahwa semakin masuk ke dalam nyala api nilai mass

fraction NO semakin bertambah. Trendline mulai bergeser kembali ke kiri pada jarak -0,1 m mass fraction NO $2,02\text{E-}03$ kg/kg menunjukan pada bagian luar api ada batubara yang masih belum terbakar.

Timbulnya NO dikarenakan temperatur yang tinggi yang kemudian mengikat Oksigen dengan Nitrogen. Untuk variasi laju aliran massa *swirl air* 0,076 kg/s paling banyak menghasilkan NO dikarenakan temperatur hasil pembakaran yang lebih tinggi dari variasi laju aliran massa *swirl air* yang lain.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa pada burner dengan variasi panjang *extension chamber* dan laju aliran massa menggunakan pemodelan numeric *software Ansys Fluent 14.0* maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Penambahan laju aliran massa *swirl air* yang *optimum* sebesar 0,061 kg/s diantara laju aliran 0,047 kg/s; 0,061 kg/s dan 0,076 kg/s. Volume nyala api kembali membesar jika diberikan laju aliran massa melebihi 0,061 kg/s disebabkan adanya gaya sentrifugal yang besar sehingga partikel batubara terlempar keluar dan menyebabkan volume api yang lebih besar.
2. Adanya pengaruh *swirl air* terhadap laju pembakaran dapat dilihat dari *particle tracks* batubara berdasarkan warna temperaturnya yang meningkat pada combustion chamber. Adanya udara masuk dengan sudut 60° menyebabkan udara dapat masuk kedalam nyala api lebih cepat, laju pembakaran yang paling optimum pada variasi laju aliran massa *swirl air* 0,061 kg/s.

5.2 Saran

1. Perlu dianalisa tentang sudut optimal pada fin, pada sudut berapa laju pembakaran yang paling optimal.
2. Analisa tentang turbulency pada aliran *swirl air* terhadap lajupembakaran.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

1. Zengqi Li, 2009 dkk 2009. *Bituminous coal combustion in a full-scale start-up ignition burner: Influence of the excess air ratio*
2. Chunlong Liu dkk 2010. "*Influence of coal-feed rates on bituminous coal ignition in a full-scale tiny-oil ignition burner*"
3. Nasser shelil 2009. **Flashback studies with premixed swirl combustion**. Cardiff school of engineering, Institute of energy, cardiff university
4. Sa'adiyah, Devy Setiorini 2013. **Studi Numerik Karakteristik Aliran, Pembakaran dan Emisi Gas Buang pada *Tangentially Fired Boiler* 625 MWe dengan Komposisi Batubara 70% LRC dan 30% MRC pada Kondisi Pengoperasian yang Berbeda**. Jurusan Teknik Mesin ITS
5. Turns, Stephen R. 2000. **An Introduction To Combustion Concepts and Applications**. Singapore
6. <http://www.eia.gov/countries/cab.cfm?fips=id>
7. <http://forum.bulk-online.com/showthread.php?24123-Solids-Loading-Ratio-%28SLR%29>

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya, 30 Maret 1990. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SDN Wonokusumo VI/45 Surabaya, SMPN 2 Surabaya, SMAN 19 Surabaya, D3 Teknik Mesin ITS pada tahun 2012, penulis melanjutkan studinya di Jurusan S1 Teknik Mesin FTI-ITS dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP. 2112 105 049. Dalam studinya, penulis memilih bidang studi Konversi Energi dengan mengambil topik Teknik Bahan Bakar sebagai Tugas Akhirnya.

Selain aktif mengikuti kegiatan perkuliahan. Penulis juga pernah mengikuti berbagai kegiatan didalam maupun diluar kampus. PT. Samator Intiperoksida Gresik merupakan tempat kerja praktek penulis pada tahun 2009. Penulis dapat dihubungi di alamat email didead.kun@gmail.com.